

Haziran, 2026

GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA TEORİ VE UYGULAMALAR

EDİTÖRLER

DR. ÖĞRETİM ÜYESİ ABDÜLKADİR DİLBER
DR. ÖĞRETİM ÜYESİ CAFER AKYÜREK

Gıda Bilimleri ve Mühendisliği Alanında Teori ve Uygulamalar

Editörler

Dr. Öğretim Üyesi Abdülkadir Dilber

Dr. Öğretim Üyesi Cafer Akyürek

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör

Dr. Öğretim Üyesi Abdülkadir Dilber & Dr. Öğretim Üyesi Cafer Akyürek

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Haziran, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-92-9

©copyright

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

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480,
Mamak, Ankara, Türkiye.

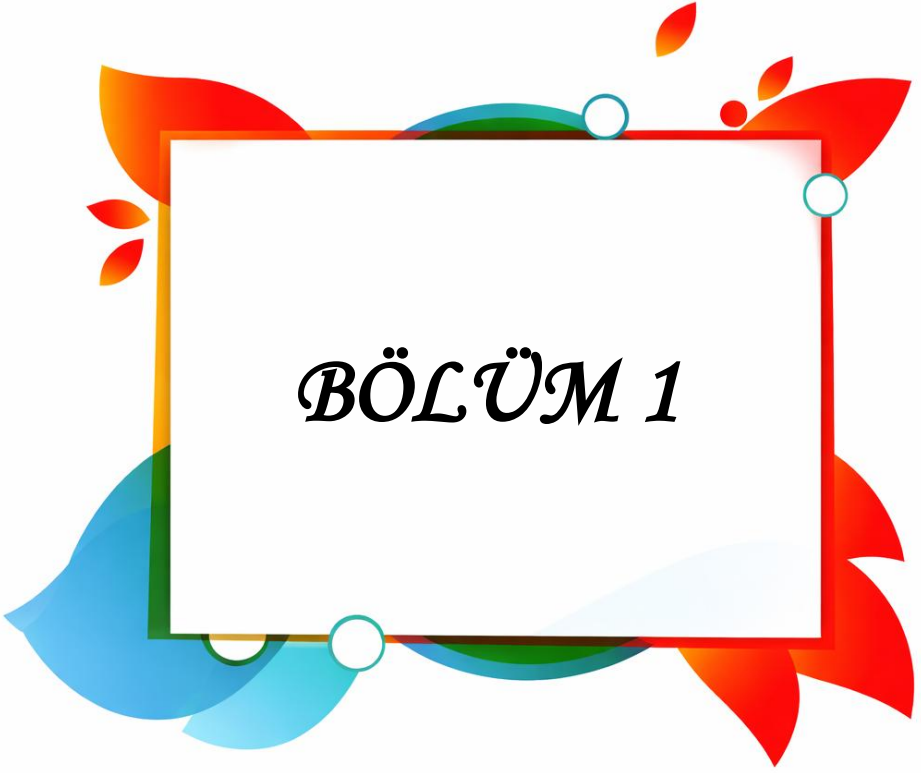
Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Et ve Et Ürünlerinin Biyokontrolünde Bakteriyofaj Kullanımı	
Gülsüme Bıçakcı & Esra Acar Soykut	
BÖLÜM 2.....	45
Süt ve Fermente Süt Ürünlerinde Mikroplastikler: Süreç, Matriks ve Sağlık Etkileri Üzerine Bütüncül Bir Yaklaşım	
Gencehan Karadağoglu	
BÖLÜM 3.....	83
Postbiyotikler: Mikrobiyal Metabolitlerden Sağlık Destekleyici Bileşenlere	
Muhammet Fatih İşleyen & Nurdan Arslankoz İşleyen	
BÖLÜM 4.....	121
Sous Vide Pişirme Yönteminin Et ve Sebze Ürünlerinin Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri	
Serpil Yalım Kaya	
BÖLÜM 5.....	147
Bakliyatların Genel Özellikleri, Anti-Besinsel Faktörleri ve Gıda Olarak Önemi	
Serpil Yalım Kaya	



BÖLÜM 1

Et ve Et Ürünlerinin Biyokontrolünde Bakteriyofaj Kullanımı

Gülsüme Bıçakcı¹ & Esra Acar Soykut²

1. GİRİŞ

Et ve et ürünleri, yüksek biyolojik değere sahip proteinler, vitaminler ve mineraller içermeleri nedeniyle insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, yüksek su aktivitesi, zengin besin içeriği ve çoğu zaman minimal işleme tabi tutulmaları, bu ürünleri mikroorganizmaların gelişimi açısından son derece elverişli bir matris hâline getirmektedir. Kesim öncesi, kesim sırası ve sonrasında oluşan kontaminasyonlara bağlı olarak; çoğunlukla bakteriler işleme, depolama ve dağıtım sürecinde çoğalarak gıda kaynaklı hastalık riskini önemli ölçüde artırmaktadır (Kanaan & Tarek, 2022).

Gıda kaynaklı hastalıklar küresel ölçekte önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmekte olup, et ve et ürünleri bu salgınlarla en sık ilişkilendirilen gıda grupları arasında yer almaktadır. Özellikle Gram negatif bakterilerden *Salmonella* Enteritidis ve Typhimurium serotipleri ile Shiga toksin üreten *E. coli* O157:H7 ve Gram pozitif bakterilerden *L. monocytogenes* düşük infeksiyöz dozları, çevresel koşullara dayanıklılıkları ve soğuk depolama koşullarında bile canlılıklarını koruyabilmeleri ve hatta çoğalabilmeleri nedeniyle ciddi risk oluşturmaktadır (Gencay, Ayaz, Copuroglu, & Erol, 2016; Guenther, Huwyler, Richard, & Loessner, 2009; Kim vd., 2020). Tüketime hazır (ready-to-eat, RTE) et ürünlerinde bu patojenlerin varlığı, özellikle bağışıklık sistemi baskılanmış bireylerde, çocuklarda, yaşlılarda ve gebelerde yüksek ölüm oranlarıyla seyreden enfeksiyonlara yol açabilmektedir (Vikram vd., 2021).

Geleneksel gıda koruma ve dekontaminasyon yaklaşımları; kimyasal koruyucular, ısı işlemleri, yüksek basınç uygulamaları ve sanitasyon ajanlarının kullanımına dayanmaktadır. Ancak bu yöntemlerin bir kısmı, ürünün duyu ve besinsel özelliklerinde olumsuz değişimlere neden olabilmekte ve tüketicilerin “temiz etiketli gıda” beklentileriyle çelişmektedir (Costa vd., 2023; Xu, 2021). Buna ek olarak, hayvansal üretimde ve gıda zinciri boyunca antibiyotiklerin

¹ Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-4901-9787

² Prof. Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6639-4212

yaygın kullanımı, antibiyotik dirençli mikroorganizmaların seçilimini hızlandırmakta ve gıda güvenliği açısından yeni risk alanları oluşturmaktadır (Cristobal-Cueto vd., 2021; Garvey, 2022).

Antimikrobiyal direncin küresel ölçekte artışı, yalnızca klinik tedavi seçeneklerini sınırlamakla kalmamakta, aynı zamanda gıda üretim sistemlerinde alternatif biyokontrol stratejilerine duyulan ihtiyacı da artırmaktadır. Bu bağlamda biyolojik kontrol ajanları, özellikle hedef özgüllüğü yüksek, çevre dostu ve tüketici tarafından kabul edilebilir çözümler sunmaları nedeniyle ön plana çıkmaktadır (Choi vd., 2025; Vikram vd., 2021). Bakteriyofajlar (faj), yalnızca etkili oldukları bakterileri enfekte edip lizise uğratmaları ve insan hücreleri ile faydalı mikrobiyota üzerinde olumsuz etki göstermemeleri nedeniyle biyolojik ajanlar arasında öne çıkmaktadır (Anany vd., 2011; Endersen vd., 2014).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, fajların et ve et ürünlerinde *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp. ve *E. coli* O157:H7 gibi önemli patojenlerin kontrolünde etkili olabileceğini göstermiştir (Costa vd., 2023; Guenther vd., 2009; Xu, 2021). Serbest faj uygulamalarının yanı sıra faj kokteylleri, faj türevli enzimler (endolizinler) ve fajların taşıyıcı sistemlerle birlikte kullanımı, biyokontrol etkinliğini artıran yenilikçi yaklaşımlar olarak rapor edilmiştir (Anany vd., 2011). Ayrıca, fajların biyofilm oluşumunu baskılayabilmesi ve gıda temas yüzeylerinde dekontaminasyon amacıyla kullanılabilmesi, et endüstrisi açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir (Atterbury, 2009; Vikram vd., 2021).

Bu bölümde, et ve et ürünlerinde faj temelli biyokontrol yaklaşımları kapsamlı biçimde ele alınacaktır. Et ürünlerinde gıda güvenliği sorunları ve mevcut kontrol yöntemlerinin sınırlılıkları tartışıldıktan sonra, fajların biyolojisi, etki mekanizmaları ve farklı et matrikslerindeki uygulamaları ayrıntılı olarak incelenecektir. Ayrıca faj türevleri, taşıyıcı ve ambalaj sistemleri, güvenlik ve regülasyon boyutları ile gelecekteki araştırma ve uygulama perspektifleri, güncel literatür ışığında bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilecektir.

2. ET VE ET ÜRÜNLERİNDE GIDA KAYNAKLI PATOJENLER VE MEVCUT KONTROL YAKLAŞIMLARI

Et ve et ürünleri, kesimden tüketime kadar geçen süreçte çok sayıda kontaminasyon kaynağına maruz kalabilen karmaşık gıda matriksleridir. Hayvanın doğal mikrobiyotası, kesimhane ortamı, ekipmanlar, personel hijyeni ve çapraz kontaminasyon, patojen mikroorganizmaların et yüzeyine taşınmasında etkili olan başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle minimal işleme tabi tutulan veya tüketime hazır et ürünlerinde, bu mikroorganizmaların hayatta kalması ve çoğalması, gıda güvenliği açısından ciddi riskler oluşturmaktadır (Atterbury, 2009; Kanaan & Tarek, 2022).

2.1. Et ve Et Ürünleriyle İlişkili Başlıca Gıda Kaynaklı Patojenler

Et ve et ürünleri, *Salmonella* spp., *L. monocytogenes* ve Shiga toksin üreten *E. coli* (STEC) gibi gıda kaynaklı patojenlerle sıklıkla ilişkilendirilen ürün grupları arasında yer almaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, gıda kaynaklı hastalıklar dünya genelinde her yıl yaklaşık 600 milyon kişiyi etkilemekte ve 420.000'den fazla ölüme yol açmaktadır; bu ölümlerin yaklaşık %40'ı beş yaş altı çocuklarda görülmektedir. Bu küresel hastalık yükünün önemli bir bölümü, et ve hayvansal ürünlerle ilişkilendirilen bakteriyel patojenlerden kaynaklanmaktadır. Söz konusu mikroorganizmalar; çevresel stres koşullarına yüksek dayanıklılıkları, düşük infeksiyöz dozları ve bazı türlerin soğutma sıcaklıklarında dahi çoğalabilmeleri nedeniyle gıda güvenliği açısından kontrolü zor patojenler olarak kabul edilmektedir (Vikram vd., 2021; WHO, 2024).

Salmonella spp., çiğ veya az pişmiş et ürünleriyle sıklıkla ilişkilendirilen ve geniş bir konak aralığına sahip olan önemli bir gıda kaynaklı patojendir. Kesim öncesi hayvanlarda asemptomatik taşıyıcılığın yaygın olması, kesimhaneye ve işleme ortamlarında çapraz kontaminasyon riskini artırmaktadır. Non-tifoidal *Salmonella*, dünya genelinde diyare ile seyreden gıda kaynaklı hastalıkların en önemli dört etkeninden biri olup, her yıl milyonlarca vaka ile ilişkilendirilmektedir. *Salmonella*'nın çok sayıda serotipe sahip olması ve et ürünlerinde haftalarca, su ortamlarında ise aylarca canlılığını koruyabilmesi, özellikle kanatlı ve kıyma bazlı ürünlerde gıda güvenliği açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır. Bu durum, bazı serotiplerde bildirilen antimikrobiyal direnç varlığıyla birlikte değerlendirildiğinde, *Salmonella* kaynaklı enfeksiyonların kontrolünü daha da güçleştirmektedir (Hungaro vd., 2013; Kim vd., 2020; WHO, 2018c).

Soğukta çoğalabilme yeteneği ile öne çıkan *L. monocytogenes*, özellikle soğukta muhafaza edilen tüketime hazır et ürünlerinde önemli bir gıda güvenliği riski oluşturmaktadır. Bu mikroorganizma, biyofilm oluşturma kapasitesi sayesinde gıda işleme ortamlarında uzun süre varlığını sürdürebilmekte ve sanitasyon uygulamalarına karşı direnç gösterebilmektedir. Listeriyozis, görülme sıklığı düşük olmasına rağmen (yıllık 0,1-10 vaka/milyon kişi), %20-30'a varan ölüm oranları nedeniyle en ciddi gıda kaynaklı enfeksiyonlar arasında yer almaktadır. Özellikle gebeler, yaşlılar, çocuklar ve bağışıklık sistemi baskılanmış bireyler için yüksek risk oluşturan bu enfeksiyonlar, başta tüketime hazır et ürünleri olmak üzere uzun raf ömrüne sahip soğukta depolanan gıdalarla ilişkilendirilmektedir (Guenther vd., 2009; Montañez-Izquierdo vd., 2012; WHO, 2018b).

Özellikle sığır etleri ve kıyma ürünleriyle ilişkilendirilen Shiga toksin üreten *E. coli* (STEC), başta O157:H7 serotipi olmak üzere, yüksek patojenitesiyle öne çıkan önemli bir gıda kaynaklı patojendir. STEC enfeksiyonları genellikle kendi

kendini sınırlayan seyir gösterse de düşük infektif dozu ve Shiga toksin üretimi nedeniyle özellikle çocuklar ve yaşlılarda hemolitik üremik sendrom (HUS) gibi yaşamı tehdit eden klinik tablolara yol açabilmektedir. STEC enfeksiyonlarının yaklaşık %10'unda HUS geliştiği ve bu tablonun %3-5 oranında ölümlerle sonuçlanabildiği bildirilmektedir. Bu patojenin et yüzeylerinde ve gıda temas yüzeylerinde biyofilm oluşturabilmesi, başta kıyma ve tüketime hazır et ürünleri olmak üzere gıda zinciri boyunca yayılım riskini artırmaktadır (Anany vd., 2011; Gencay vd., 2016; WHO, 2018a).

Bunlara ek olarak *Campylobacter jejuni*, *Staphylococcus aureus* ve bazı spor oluşturan bakteriler de et ve et ürünlerinde gıda güvenliği açısından önem taşımaktadır. *Campylobacter*, dünya genelinde diyare ile seyreden gıda kaynaklı hastalıkların en önemli dört etkeninden biri olup, insanlarda bakteriyel gastroenteritin en yaygın nedenleri arasında yer almaktadır. Özellikle az pişmiş et ve et ürünleriyle ilişkili olan bu patojen, çoğu vakada hafif seyirli olsa da çocuklar, yaşlılar ve bağışıklığı baskılanmış bireylerde ciddi klinik tablolara yol açabilmektedir (WHO, 2020). Bunun yanı sıra *Clostridium botulinum* gibi spor oluşturan bakteriler, ısıya dirençli spor yapıları sayesinde çevrede uzun süre varlıklarını sürdürebilmekte ve uygun koşullarda son derece güçlü nörotoksinler üreterek nadir görülmesine rağmen yüksek ölüm oranlarıyla seyreden botulizm vakalarına neden olabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle sporlu bakteriler, et ürünlerinde geleneksel kontrol yaklaşımlarıyla mücadele edilmesi güç mikroorganizmalar arasında yer almaktadır (Sajjad vd., 2025; Vikram vd., 2021; WHO, 2023).

2.2. Et Ürünlerinde Mikrobiyal Kontrol Yöntemleri

Et ve et ürünlerinde mikrobiyal yükün azaltılması amacıyla uygulanan geleneksel kontrol yöntemleri, temel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik yaklaşımlar olarak sınıflandırılmaktadır. Fiziksel yöntemler arasında ısıtma işlemleri, soğutma, dondurma, yüksek basınç uygulamaları ve ışınlama yer almaktadır. Bu yöntemler patojen mikroorganizmaların inaktivasyonunda etkili olmakla birlikte, ürünün duyu ve besinsel özelliklerinde istenmeyen değişimlere yol açabilmektedir (Costa vd., 2023; Ge vd., 2022).

Kimyasal kontrol yöntemleri, organik asitler, nitritler ve çeşitli sanitasyon ajanlarının kullanımını içermektedir. Ancak bu maddelerin bazıları, tüketici sağlığı açısından potansiyel riskler taşımakta ve “temiz etiket” yaklaşımıyla çelişmektedir. Ayrıca kimyasal ajanların geniş spektrumlu etkileri, faydalı mikroorganizmaların da inaktivasyonuna neden olabilmektedir (Costa vd., 2023; Kanaan & Tarek, 2022).

Biyolojik kontrol yaklaşımları ise bakteriyosinler, koruyucu kültürler ve fajlar gibi doğal ajanların kullanımını kapsamaktadır (Komora vd., 2021; Vikram vd., 2021). Bu ajanlar içerisinde yer alan fajlar, hedef mikroorganizmalara yüksek

özgüllük göstermeleri ve uygulandıkları gıda matriksi üzerinde duyuşal ya da besinsel açıdan herhangi bir olumsuz etki oluşturmamaları nedeniyle son yıllarda gıda güvenliğı alanında artan bir ilgiyle öne çıkmaktadır. Özellikle litik fajların yalnızca hedef patojenleri inaktive etmesi, doğal mikrobiyotayı ve ürün kalitesini koruması, onları et ve et ürünlerinde umut vadeden biyokontrol ajanları haline getirmektedir (Dölger & Özpınar, 2021; Moye, vd., 2018).

2.3. Mevcut Yaklaşımların Sınırlılıkları ve Alternatif Arayışlar

Geleneksel mikrobiyal kontrol yöntemlerinin önemli sınırlılıkları bulunmaktadır. Fiziksel ve kimyasal uygulamalar, patojenlerin tamamen elimine edilmesini her zaman sağlayamamakta; ayrıca ürün kalitesi ve tüketici kabulü üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra antibiyotiklerin hayvansal üretimde yaygın kullanımı antibiyotik dirençli bakterilerin seçilimini hızlandırarak gıda zinciri boyunca direnç genlerinin yayılımına katkıda bulunmaktadır. Diğer taraftan bitkisel üretimde kullanımları yasak olmasına rağmen bazı antibiyotiklerin bitkilere uygulanması, bu bitkileri tüketen insan ve hayvanlarda, sağlık sorunları oluşturacak antibiyotik direnç genlerinin yayılmasına neden olabilecektir (Cristobal-Cueto vd., 2021; Garvey, 2022).

Bu sınırlamalar, et ve et ürünlerinde daha hedefe yönelik, çevre dostu ve sürdürülebilir biyokontrol stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda faj temelli yaklaşımlar, yalnızca hedef patojenleri etkileyen mekanizmaları ve doğal kökenleri nedeniyle mevcut kontrol yöntemlerine güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Atterbury, 2009; Greer, 2005).

3. FAJLARIN BİYOLOJİSİ VE ET SİSTEMLERİNDE ETKİ MEKANİZMALARI

Fajlar yalnızca bakterileri enfekte eden ve çoğalmak için sadece özgül olduğu bakteri tür ve/veya suşunu kullanan virüslerdir. Doğal olarak çevrede son derece yaygın bulunmaları ve farklı gıda matrikslerinden sıklıkla izole edilebilmeleri, bu biyolojik ajanların gıda güvenliğı açısından önemini artırmaktadır. Et ve et ürünleri de dahil olmak üzere hayvansal gıdalarda fajların varlığı, bu mikroorganizmaların doğal mikrobiyal ekosistemin bir parçası olduğunu göstermektedir (Costa vd., 2023; Vikram vd., 2021).

3.1. Fajların Yapısal Özellikleri ve Sınıflandırılması

Fajlar genellikle bir kapsid (protein kılıf), genetik materyal (DNA veya RNA) ve çoğu zaman konak hücreye bağlanmayı sağlayan bir kuyruk yapısından oluşmaktadır. Et ürünlerinde biyokontrol amacıyla kullanılan fajların büyük çoğunluğu, tarihsel olarak morfolojik özelliklerine göre Caudovirales takımında sınıflandırılan, çift iplikli DNA genomuna sahip litik fajlardır. Bu kapsamda kasılabilen kuyruklu fajlar *myovirüs*, uzun kasılmayan kuyruklu fajlar *siphovirüs* ve kısa kuyruklu fajlar ise *podovirüs* olarak tanımlanmış; bu gruplar gıda

kaynaklı patojenlere karşı etkinliği gösterilmiş çok sayıda fajı içermiştir. Ancak Uluslararası Virüs Taksonomisi Komitesi (ICTV) tarafından 2022 yılında yapılan güncelleme ile morfolojiye dayalı *Myoviridae*, *Siphoviridae* ve *Podoviridae* aileleri resmi taksonomiden kaldırılmış ve fajlar genomik benzerliklere dayalı olarak yeniden sınıflandırılmıştır. Günümüzde *myovirüs*, *siphovirüs* ve *podovirüs* terimleri taksonomik bir anlam taşımamakla birlikte, morfolojik özellikleri tanımlayan ve literatürde yaygın olarak kullanılan kavramsal ifadeler olarak yer almaya devam etmektedir (Anjay vd., 2022; Islas Vega vd., 2025; Turner vd., 2023).

Gıda biyokontrolünde kullanılacak fajların seçimi sırasında, genetik stabilite, konak özgüllüğü ve çevresel koşullara dayanıklılık gibi özellikler kritik önem taşımaktadır. Bu nedenle, bakteri inhibisyonu açısından aday olan litik fajların, gelişim parametrelerinin öncelikle ortaya konması önem taşımaktadır. Tek aşamalı gelişme eğrileri elde edilen fajlarda latent dönem süresi ile patlama büyüklüğü belirlenerek fajın çoğalma dinamikleri karakterize edilmektedir. Bunu takiben, fajın farklı konakçılar üzerindeki enfektivite düzeyini değerlendirmek amacıyla plak etkinliği (EOP; efficiency of plaquing) değerleri hesaplanmakta; ayrıca fajın konak hücreye bağlanma kapasitesini ortaya koymak için adsorpsiyon yüzdesi ve adsorpsiyon katsayısı tayin edilmektedir (Jurač vd., 2019).

EOP, bir fajın referans konakçıya kıyasla alternatif konakçılar üzerinde oluşturduğu plak sayısını ifade eden ve konak özgüllüğünü nicel olarak yansıtan önemli bir parametredir. Adsorpsiyon yüzdesi, belirli bir süre içerisinde faj partiküllerinin konak hücreye bağlanma oranını gösterirken, adsorpsiyon katsayısı faj-konak etkileşiminin kinetiğini tanımlayan ve bağlanma hızını ifade eden bir ölçüt olarak kullanılmaktadır (Tokman vd., 2016). Tüm bu çalışmalar gerçekleştirilirken yaklaşık bakteri başına düşen faj sayısını ifade eden ve enfeksiyon çokluğu (Multiclicity of Infection, MOI) olarak tanımlanan değerin bilinmesi gerekmektedir.

Bunun yanı sıra faj genomunda, konakçıya ait patojeniteden sorumlu gen bölgelerinin bulunup bulunmadığı ile lizogeniye geçişle ilişkili integras ve eksisyonaz enzimlerini kodlayan sırasıyla *int* ve *xis* genlerinin varlığı genomik analizlerle doğrulanmalıdır. Son olarak, fajların uygulanacağı gıda matriksine bağlı olarak farklı sıcaklık ve pH aralıkları ile ortamda bulunabilecek değişen tuz ve şeker konsantrasyonları altında aktifliğini sürdürebilme potansiyeli değerlendirilerek endüstriyel kullanım açısından uygunluğu ortaya konmaktadır. Özellikle et matriksinde kullanılacak fajların, düşük sıcaklık, değişken pH ve yüksek protein içeriği gibi faktörler altında infektivitesini koruması gerektiğini unutmamak gerekmektedir (Anany vd., 2011; Holzer vd., 2025).

3.2. Litik ve Lizogenik Yaşam Döngüleri

Fajlar, konakçı bakteri hücrelerine kendi genomik materyallerini enjekte ettikten sonra temel olarak Litik ve Lizogenik olarak adlandırılan iki farklı yaşam döngüsünü izleyebilmektedir.

Litik döngüde faj, konak bakteri hücrelerine adsorbe olduktan sonra genomik materyalini hücre içerisine enjekte etmekte ve kısa sürede hücre metabolizmayı kendi replikasyonu lehine yönlendirmektedir. Bu süreçte erken genlerin ifadesiyle konak savunma mekanizmaları baskılanmakta ve faj replikasyonu için gerekli enzimler sentezlenirken, orta genlerin ekspresyonu genom çoğaltımını ve yapısal proteinlerin üretimini desteklemektedir. Geç genlerin ifadesiyle kapsid ve kuyruk proteinlerinin sentezi tamamlanmakta, ardından yeni faj partiküllerinin montajı gerçekleşmektedir. Döngünün son aşamasında holin proteinleri sitoplazmik membranda porlar oluşturarak endolizinin enzimlerinin hücre duvarına ulaşmasını sağlamakta; endolizinin peptidoglikan yapıyı parçalanmasıyla birlikte hücre lizisi meydana gelmekte ve olgun faj partikülleri ortama salınmaktadır (Dhulipalla vd., 2025; Endersen vd., 2014). Bu mekanizma, hedef bakterinin hızlı ve etkin bir şekilde elimine edilmesiyle sonuçlandığından, gıda biyokontrol uygulamalarında tercih edilen temel etki mekanizması olarak kabul edilmektedir (Suja & Gummati, 2024).

Lizogenik döngüde ise faj genomu bakteri hücrelerine dahil olduktan sonra plazmid gibi sirküler formda sitoplazmada kalabilmekte veya bakteri kromozomuna bakteri ve fajda bulunan bağlanma bölgelerinden (sırasıyla *attB* ve *attP*) entegre olmaktadır. Bakteri genomuna entegre olan faj genomu profaj olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla faj genomu bakterinin her bölünmesinde bakteri genomu ile birlikte replike olduğundan kardeş hücrelere aktarılmaktadır. Bu durum, faj genomunun sıcaklık değişimi, UV ışığa maruz bırakılma veya mitomisin C uygulaması ile indüklenmesine kadar devam etmektedir. İndüksiyon uygulaması fajın litik yaşam döngüsüne geçişini sağlamak ve bakterinin lizisi ile son bulmaktadır. Bir bakterinin lizogenik olması ve hemen elimine edilmemesi, potansiyel olarak virülans veya direnç genlerinin yatay gen transferiyle yayılması riskini beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle gıda güvenliği uygulamalarında lizogenik fajların kullanımı genellikle önerilmemektedir; yalnızca genetik olarak iyi karakterize edilmiş, tamamen litik fajların tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Galarce vd., 2016; Yan vd., 2021).

3.3. Et Matriksi İçerisinde Faj-Bakteri Etkileşimleri

Et ve et ürünleri, faj-bakteri ilişkisini doğrudan etkileyen karmaşık fizikokimyasal özelliklere sahiptir. Protein ve yağ içeriğinin yüksek olması, faj partiküllerinin et yüzeyine adsorpsiyonunu ve bakterilere erişimini sınırlayabilmektedir. Ayrıca et yüzeyindeki mikro çatlaklar ve biyofilm oluşumu,

patojen bakterilerin fajlardan korunmasına neden olabilmektedir (Choi vd., 2025; Kanaan & Tarek, 2022).

Fajların et matriksindeki etkinliği; uygulama dozu, temas süresi, sıcaklık ve hedef bakteri yoğunluğu gibi faktörlere bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda bakteriyel metabolizmanın yavaşlaması, faj replikasyon hızını sınırlayabilmektedir. Bu gibi durumlarda ortamda faj sayısının bakteri sayısından kat kat fazla olması sağlanmaktadır. Böylece konakçı hücre duvarına adsorbe olan faj sayısı artmakta, adsorpsiyona bağlı hücre duvarının zarar görmesi söz konusu olmakta ve bakteri, hücre duvarı tamirine yetişemediği için parçalanmaktadır. Bu durum enfeksiyon olmadan lizis (lysis without infection) olarak tanımlanmaktadır (Hudson vd., 2005).

Bununla birlikte, yapılan deneysel çalışmalar, uygun doz ve uygulama koşulları sağlandığında fajların çiğ ve pişirilmiş et ürünlerinde patojen bakteri sayısını anlamlı düzeyde azalttığını göstermektedir. Özellikle yüzey uygulamalarında fajların hedef bakterilerle doğrudan temas etmesi, biyokontrol etkinliğini artıran önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Rodríguez-Marca vd., 2025; Talavera-González vd., 2025).

3.4. Biyofilm Oluşumu ve Fajların Rolü

Et işleme ortamlarında ve et yüzeylerinde oluşan biyofilmler, patojen bakterilerin çevresel streslere ve sanitasyon uygulamalarına karşı direnç kazanmasında önemli rol oynamaktadır. *L. monocytogenes* ve *E. coli* O157:H7 gibi patojenlerin biyofilm oluşturma kapasitesinin yüksek oluşu, gıda temas yüzeylerinde sürekli kontaminasyona maruz kalma ihtimalini artırmaktadır (Cristobal-Cueto vd., 2021; Montañez-Izquierdo vd., 2012).

Fajlar, bakterilerin polisakkaritler salgılayarak oluşturdukları biyofilmleri, sentezledikleri depolimeraz gibi enzimler ile parçalamakta böylece konakçı bakterilerine ulaşabilmektedirler. Böylece biyofilm oluşturarak kendilerini korumaya alan konakçı bakteriler, spesifik fajlar ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu özellik, fajların yalnızca gıdanın kendisinde değil, aynı zamanda gıda işleme ekipmanları ve temas yüzeylerinin dekontaminasyonunda da kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır (Endersen vd., 2014; Suja & Gummedi, 2024).

3.5. Faj Direnci ve Adaptasyon Mekanizmaları

Fajlar, bakterilere karşı spesifik özgülük gösterebilirler de konakçı görevi gören bu bakteriler de spesifik olarak, fajlara karşı direnç geliştirebilmektedir. İstenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkan bu ihtimal, faj etkinliğini sınırlandırmaktadır. Bakteriyel yüzey reseptörlerinin değişimi, restriksiyon-modifikasyon sistemleri ve CRISPR-Cas mekanizmaları, faj direncinin oluşumunu sağlayan başlıca moleküler sistemler arasında yer almaktadır (Ahmad vd., 2025; Dhulipalla vd., 2025).

İnhibisyonu amaçlanan patojen bakterilerin fajlara karşı direnç geliştirmeleri ihtimaline karşı, birden fazla fajın kombinasyonu ile oluşturulan faj kokteyllerinin kullanımı yaygın bir strateji olarak önerilmektedir. Faj kokteylleri, konak aralığını genişleterek ve direnç gelişimini geciktirerek biyokontrol etkinliğini artırabilmektedir. Et ürünlerinde yapılan çalışmalar, faj kokteyllerinin tekil faj uygulamalarına kıyasla daha tutarlı ve uzun süreli patojen baskılanması sağladığını göstermektedir (Evrans vd., 2022; Suja & Gummadi, 2024).

4. ET VE ET ÜRÜNLERİNDE FAJ TEMELLİ BİYOKONTROL UYGULAMALARI

Fajların et ve et ürünlerinde biyokontrol amacıyla kullanımı, hedef patojenlere karşı yüksek özgülük göstermeleri ve gıda matrisi üzerinde son yıllarda yoğun biçimde araştırılmaktadır. Özellikle *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp. ve *E. coli* O157:H7 gibi halk sağlığı açısından kritik patojenlere yönelik faj uygulamaları hem laboratuvar ölçeğinde hem de endüstriyel koşullarda umut verici sonuçlar ortaya koymuştur (Bigot vd., 2011; Seo vd., 2016; Wessels vd., 2021). Ayrıca kanatlı etleriyle ilişkili *C. jejuni*, yine işlenmiş et ürünlerinde karşımıza çıkan *S. aureus* ve soğukta depolanan etlerde baskın bozulma etmenleri arasında yer alan *Pseudomonas* spp. gibi diğer mikroorganizmalar için de faj temelli biyokontrol stratejileri geliştirilmektedir (Abd-El Wahab vd., 2023; Efenberger-Szmechtyk & Nowak, 2025). Son beş yıl içerisinde et ve et ürünleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel faj uygulamalarına ait seçilmiş çalışmaların özeti **Tablo 1**'de sunulmaktadır. Tablo 1'de yer verilen bu çalışmalar, farklı et matrisleri, hedef mikroorganizmalar (patojenler ve bozulma etmenleri) ve uygulama stratejileri açısından güncel literatürdeki eğilimleri bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Son 5 yılda et ve et ürünlerinde bakteriyofaj uygulamalarına örnek çalışmalar

Et ürünü / matriks	Faj / yaklaşım	Hedef bakteri	Temel bulgu	Referans
Çiğ tavuk eti	Faj kokteyli	<i>S. Typhimurium</i>	Tavuk etinde $\approx 1-2.5 \log \text{ kob g}^{-1}$ <i>Salmonella</i> azalması	(Anjay vd., 2022)
Tavuk eti	Faj kokteyli	<i>S. Typhimurium</i>	Tavuk etinde düşük sıcaklıkta $\approx 1.4 \log \text{ kob g}^{-1}$ azalma	(Aguilera vd., 2022)
Tavuk eti (soğuk depolama/MAP)	Faj kokteyli + propiyonik asit + MAP	<i>Salmonella</i> spp.	MAP + faj uygulamasıyla <i>Salmonella</i> baskılanması	(Pelyuntha & Vongkamjan, 2023)
RTE tavuk göğsü	PS3-1	<i>S. Typhimurium</i>	RTE tavukta <i>Salmonella</i> azalması	(Zhao vd., 2023)
Çiğ domuz bonfilesi	Litik faj + laktik asit	<i>E. coli</i> O157:H7	Domuz etinde <i>E. coli</i> O157:H7 inhibisyonu	(Li vd., 2023)
Dilimlenmiş jambon	3 faj kokteyli (EH11, EP26, EP27)	EHEC (<i>E. coli</i>)	Dilimlenmiş jambonda EHEC azalması ve biyofilm inhibisyonu	(Nam vd., 2025)
Çiğ et filetoları (sığır/tavuk/domuz)	Aktif film içine entegre fajlar (S16, FO1a)	<i>S. Enteritidis</i>	Aktif filmle <i>Salmonella</i> büyüme baskılanması	(Costa vd., 2026)
Çiğ tavuk filetoları	3 faj kokteyli	<i>Salmonella</i> ve <i>E. coli</i>	72 saatte $\approx 1.5 \log \text{ kob g}^{-1}$ <i>Salmonella</i> ve <i>E. coli</i> azalması	(Berhilevych vd., 2026)
Tavuk fileto	Tek faj (BF1354)	<i>S. Enteritidis</i>	<i>S. Enteritidis</i> yükünde $\approx 0.8-2.1 \log \text{ kob g}^{-1}$ azalma	(Zulkameev vd., 2025)
Çiğ sığır eti	Tek litik faj (LMLPA3)	<i>L. monocytogenes</i>	Sığır etinde $\approx 2.9 \log \text{ kob g}^{-1}$ <i>Listeria</i> azalması	(Liu vd., 2025)
Tavuk eti	Tek faj (CC_R7)	<i>C. jejuni</i> ve <i>C. coli</i>	Tavuk etinde $\approx 1.2 \log \text{ kob g}^{-1}$ <i>Campylobacter</i> azalması ve biyofilm inhibisyonu	(Rafiq vd., 2025)
Soğutulmuş tavuk ürünleri	P1, P9, P20	<i>Pseudomonas</i>	<i>Pseudomonas</i> baskılanması; yüksek sıcaklık-pH stabilitesi ve genomik güvenlik	(Hu vd., 2025)
Domuz eti	Faj endolizini (LysPFX32)	<i>P. fluorescens</i>	Domuz etinde <i>P. fluorescens</i> baskılanması	(Guan vd., 2025)
Sosis	Tek litik faj (vB_SaRS_FS19-1)	<i>S. aureus</i>	Sosiste <i>S. aureus</i> baskılanması ve yüksek çevresel stabilite	(Yao vd., 2025)

4.1. *Listeria monocytogenes*'in Kontrolünde Faj Uygulamaları

L. monocytogenes, düşük sıcaklıklarda çoğalabilme yeteneği ve biyofilm oluşturma kapasitesi nedeniyle özellikle tüketime hazır et ürünlerinde ciddi bir gıda güvenliği riski oluşturmaktadır. Bu nedenle *L. monocytogenes*'e özgü litik fajların geliştirilmesi ve gıda sistemlerinde uygulanması üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.

Ticari olarak geliştirilen ve Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından genel olarak güvenli kabul edilen (GRAS) statüsünde onaylanan ilk *Listeria* faj preparatlarından biri olan Listex™ P100, bu alandaki en iyi karakterize edilmiş örneklerden biridir. P100, geniş konakçı aralığına sahip litik bir faj olup özellikle tüketime hazır et ürünlerinde yüzey uygulamaları için geliştirilmiştir. Carlton ve ark. (2005), P100 uygulamasının çeşitli gıda matrislerinde *L. monocytogenes* popülasyonunu 2-5 log düzeyinde azaltabildiğini bildirmiştir. Guenther ve ark. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise P100'ün, RTE et ürünlerinde yaklaşık 1-3 log düzeyinde azalma sağladığı ve

soğuk depolama süresince etkinliğini koruduğu gösterilmiştir. Bu durum, P100'ün özellikle depolama boyunca pasif lizis etkisiyle bakteriyel yükü kontrol altında tutabildiğini ortaya koymaktadır.

P100 dışında da *L. monocytogenes*'e özgü çeşitli litik fajlar tanımlanmıştır. Örneğin, A511 fajı et ürünlerinde ve yüzey uygulamalarında 2-4 log düzeyinde azalma sağlayabilmiş ve geniş serotip spektrumunda etkinlik göstermiştir (Ahmadi, Barbut, Lim, & Balamurugan, 2020). Benzer şekilde, yakın dönemde karakterize edilen LMLPA3 fajının süt örneklerinde yaklaşık 4 log kob/mL, çiğ sığır eti yüzeyinde ise yaklaşık 2.9 log kob/g düzeyinde azalma sağladığı bildirilmiştir. Bu fajın ayrıca farklı serotiplere karşı geniş konakçı aralığına sahip olduğu ve biyofilm yapılarının parçalanmasında etkili olduğu gösterilmiştir (Liu vd., 2025).

Bazı çalışmalarda ise tek faj uygulamalarına kıyasla faj kokteyllerinin daha yüksek mikrobiyal azalma oranları sağladığı rapor edilmiştir (Dhulipalla vd., 2025). Özellikle yüksek enfeksiyon çokluğu (MOI) değerleriyle uygulanan litik faj kombinasyonlarının 3-5 log düzeyine ulaşabilen azalmalar oluşturabildiği; etkinliğin ürün tipi, yüzey özellikleri ve başlangıç bakteri yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir.

Bununla birlikte, *L. monocytogenes*'in biyofilm oluşturma yeteneği, özellikle işleme ekipmanları ve paslanmaz çelik yüzeylerde kalıcı kontaminasyona yol açarak geleneksel sanitasyon yöntemlerine karşı direnç gelişmesine neden olmaktadır. Bu durum, *Listeria* kontrolünde yalnızca yüzey dekontaminasyonuna dayalı yaklaşımların çoğu zaman yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Bu doğrultuda, litik fajların biyofilm matriksi içerisine nüfuz edebilme ve biyofilm içerisindeki hücreleri hedefleyebilme kapasitesi önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Paslanmaz çelik yüzeylerde gerçekleştirilen çalışmalarda, *Listeria*'ya özgü faj uygulamalarının biyofilm yoğunluğunu anlamlı düzeyde azalttığı; bazı durumlarda 2-3 log düzeyinde biyofilm hücre azalması sağladığı bildirilmiştir (Montañez-Izquierdo vd., 2012). Ayrıca fajların sanitasyon ajanlarıyla birlikte kullanıldığında sinerjik etki oluşturabildiği ve biyofilm matriksinin daha etkin şekilde parçalanmasına katkı sağladığı gösterilmiştir (Komora vd., 2021).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, *L. monocytogenes*'e karşı geliştirilen litik fajların etkinliğinin sabit bir aralıkla sınırlı olmadığı; uygulanan faj tipi (P100, A511, LMLPA3 vb.), doz, uygulama şekli ve ürün matriksine bağlı olarak 1 ila 5 log düzeyinde değişebilen mikrobiyal azalma sağlayabildiği anlaşılmaktadır. Özellikle P100 fajının ticari uygulamaya geçmiş olması, faj temelli biyokontrol stratejilerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini gösteren en güçlü örneklerden biri olarak değerlendirilmektedir.

4.2. *Salmonella* spp. 'nin Kontrolünde Faj Uygulamaları

Salmonella spp., özellikle çiğ kırmızı et, kanatlı eti ve işlenmiş ürünlerde yaygın olarak bulunan ve geniş serotip çeşitliliği nedeniyle kontrolü güç bir patojendir. Bu mikroorganizmaya karşı geliştirilen litik fajlar hem tekil uygulamalar hem de faj kokteylleri şeklinde farklı et ürünlerinde değerlendirilmiştir.

Kanatlı karkaslarında uygulanan Felix O1 fajının yaklaşık bakteri sayısında 1-2 log düzeyinde azalma sağladığı ve etkinliğin soğuk depolama süresince korunabildiği bildirilmiştir (Hungaro vd., 2013). Benzer şekilde, tavuk eti yüzeylerinde uygulanan farklı litik *Salmonella* fajlarının 1-3 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlayabildiği rapor edilmiştir (Yeh vd., 2017).

Tek faj uygulamalarının yanı sıra, çoklu faj kombinasyonlarının kullanımı daha geniş serotip kapsama alanı sağlamaktadır. Üçlü ve dörtlü faj kokteyllerinin tavuk eti ve işlenmiş ürünlerde 2-4 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağladığı gösterilmiştir (Anjay vd., 2022; Evran vd., 2022). Çoklu faj kullanımının, farklı reseptörleri hedeflemesi sayesinde direnç gelişimini geciktirebildiği ve heterojen *Salmonella* popülasyonlarında daha tutarlı sonuçlar verdiği bildirilmektedir.

Endüstriyel ölçekte uygulamaya geçmiş örneklerden biri olan SalmoFresh™, FDA tarafından GRAS statüsünde kabul edilmiş çoklu faj içeren ticari bir preparattır (Moon, Waite-Cusic, & Huang, 2020). Bu faj kokteyli, özellikle et ve kanatlı ürün yüzeylerinde *Salmonella* spp. kontrolü amacıyla geliştirilmiş olup farklı serotiplere karşı geniş etki spektrumu sunmaktadır. Ticari uygulamalarda, uygun doz ve temas süresi sağlandığında anlamlı log düzeyinde azalma elde edilebildiği bildirilmiştir.

Ayrıca fajların organik asitler, klor bazlı dekontaminantlar veya soğuk depolama koşullarıyla birlikte uygulanması durumunda biyokontrol etkinliğinin arttığı rapor edilmiştir. Bu tür kombine uygulamalarda 3-5 log düzeyine varan azalmalar elde edilebildiği ve “engeller teknolojisi” yaklaşımı kapsamında fajların endüstriyel entegrasyonunun güçlendiği belirtilmektedir (Abd-El Wahab vd., 2023; Yeh vd., 2017).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, *Salmonella*'ya karşı geliştirilen litik fajların etkinliğinin tek bir aralıkla sınırlandırılmayacağı; kullanılan faj tipi, kokteyl kompozisyonu, doz ve ürün matriksine bağlı olarak 1 ila 5 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlayabildiği anlaşılmaktadır. Özellikle ticari faj kokteyllerinin geliştirilmiş olması, faj temelli biyokontrol stratejilerinin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel uygulamaya taşındığını göstermektedir.

4.3. *Escherichia coli* O157:H7'nin Kontrolünde Faj Uygulamaları

Düşük infeksiif dozu ve ciddi klinik sonuçları nedeniyle *E. coli* O157:H7, et ve et ürünlerinde biyokontrol çalışmalarının öncelikli hedeflerinden biridir.

Özellikle sığır eti ve kıyma bazlı ürünlerde bu patojene karşı geliştirilen litik fajların etkinliği geniş biçimde araştırılmıştır.

Tek faj uygulamalarında, sığır eti yüzeyine doğrudan uygulanan litik fajların 1-3 log düzeyinde azalma sağlayabildiği bildirilmiştir. Bazı çalışmalarda, yüksek MOI değerleriyle uygulanan fajların kısa sürede 2-4 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlayabildiği ve bu etkinin hem soğuk depolama hem de oda sıcaklığı koşullarında gözlemlendiği rapor edilmiştir (Gencay vd., 2016; Tomat, Migliore, Aquili, Quiberoni, & Balagué, 2013).

Çoklu faj kombinasyonları, farklı suşları hedefleyebilme kapasitesi nedeniyle daha tutarlı sonuçlar sağlamaktadır. Özellikle üçlü ve dörtlü faj kokteyllerinin kıyma ve hamburger örneklerinde 3-5 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlayabildiği belirtilmektedir. Çoklu faj kullanımı, direnç gelişimini geciktirme açısından da avantaj sunmaktadır.

Ticari uygulamalara geçmiş örneklerden biri olan EcoShield™ (Intralix), *E. coli* O157:H7'ye karşı geliştirilmiş çoklu faj içeren ve FDA tarafından GRAS statüsünde kabul edilmiş bir preparattır. Bu ürünün sığır eti ve işlenmiş ürün yüzeylerinde uygulanabildiği ve uygun koşullarda anlamlı miktarda bakteri sayısında azalma sağlayabildiği bildirilmiştir.

Fajların taşıyıcı yüzeyler üzerine immobilize edilmesi veya yenilebilir kaplamalar içerisine entegre edilmesi gibi yenilikçi uygulamalar da dikkat çekmektedir. Bu yöntemlerle hem çiğ hem de pişmiş et ürünlerinde patojen yükünde anlamlı azalmalar sağlanabildiği gösterilmiştir (Holzer vd., 2025; Seo vd., 2016)

Bununla birlikte, *E. coli* O157:H7'nin biyofilm oluşturma kapasitesi, faj penetrasyonunu sınırlayabilen bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle faj uygulamalarının biyofilm bozucu enzimler, şelatlayıcı ajanlar veya faj türevli endolizinlerle birlikte kullanılması önerilmektedir (Choi vd., 2025; Vikram vd., 2021). Kombine uygulamaların, tek başına faj kullanımına kıyasla daha yüksek mikrobiyal azalma oranları sağladığı bildirilmektedir.

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, *E. coli* O157:H7'ye karşı geliştirilen litik fajların etkinliğinin uygulama stratejisine bağlı olarak 1 ila 5 log düzeyinde değişebildiği; ticari faj preparatlarının geliştirilmiş olmasının ise faj temelli biyokontrolün endüstriyel uygulanabilirliğini desteklediği anlaşılmaktadır.

4.4. *Campylobacter jejuni*'nin Kontrolünde Faj Uygulamaları

Campylobacter jejuni, özellikle kanatlı etlerinde yaygın olarak bulunan ve dünya genelinde bakteriyel gastroenteritin önde gelen etkenlerinden biri olarak kabul edilen önemli bir gıda kaynaklı patojendir. Kanatlı karkaslarının işlenmesi sırasında çapraz kontaminasyona açık olması, bu mikroorganizmanın kontrolünü

güçleştirmektedir. Bundan yola çıkılarak, *C. jejuni*'ye özgü litik fajların et ve kanatlı ürünlerinde biyokontrol amacıyla kullanım potansiyeli son yıllarda artmıştır (Endersen vd., 2014).

Deneyssel çalışmalarda, tavuk karkasları ve tavuk eti yüzeylerine uygulanan *Campylobacter* fajlarının genellikle 1-3 log düzeyinde azalma sağlayabildiği rapor edilmiştir (El-Shibiny vd., 2009; Endersen vd., 2014; Wagenaar, Bergen, Mueller, Wassenaar, & Carlton, 2005). Özellikle kesim sonrası uygulamalarda ve yüksek MOI değerleri kullanıldığında 2-4 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlandığı; in vivo kanatlı çalışmalarında ise kesim öncesi uygulamaların bağırsak kolonizasyonunu 3-5 log düzeyinde azaltabildiği gösterilmiştir (Loc Carrillo vd., 2005; Wagenaar vd., 2005). Bu bulgular, fajların yalnızca yüzey dekontaminasyonu değil, üretim zincirinin farklı aşamalarında da etkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

Son yıllarda karakterize edilen litik *Campylobacter* fajlarından biri olan CC_R7'nin tavuk eti üzerinde yaklaşık 1-2 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağladığı ve biyofilm oluşumunu inhibe edebildiği bildirilmiştir. Ayrıca bu fajın geniş konakçı aralığına sahip olması ve 4-50 °C ile pH 4-10 aralığında stabil kalabilmesi, endüstriyel uygulamalar açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Endersen vd., 2014; Rafiq vd., 2025). Bu tür yeni nesil faj karakterizasyon çalışmaları, *Campylobacter* biyokontrolünde daha hedefe yönelik ve çevresel koşullara dayanıklı preparatların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, *Campylobacter*'e karşı geliştirilen litik fajların etkinliğinin uygulama aşamasına ve matrikse bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebildiği; özellikle üretim zincirinin erken basamaklarında uygulandığında daha yüksek mikrobiyal azalma oranlarına ulaşılabildiği anlaşılmaktadır.

4.5. *Staphylococcus aureus*'un Kontrolünde Faj Uygulamaları

S. aureus, et ve et ürünlerinde hem gıda zehirlenmelerine yol açan enterotoksin üretimi hem de işleme ortamlarında çapraz kontaminasyon potansiyeli nedeniyle önemli bir risk oluşturmaktadır. Ayrıca süt sığırlarında ve küçükbaş hayvanlarda mastitis etkeni olarak yaygın biçimde bulunması, bu patojenin çiftlik aşamasında hayvandan ürüne geçişini mümkün kılmaktadır. Mastitisli hayvanlardan elde edilen süt ve etlerin işlenmesi sırasında *S. aureus*'un gıda zincirine taşınabildiği bilinmektedir. Özellikle metisiline dirençli *S. aureus* (MRSA) suşlarının hem hayvan hem de insan kaynaklı izolatlarda artış göstermesi, alternatif biyokontrol yaklaşımlarına olan ihtiyacı daha da artırmıştır (Hennekinne, De Buyser, & Dragacci, 2012; Kadariya, Smith, & Thapaliya, 2014). *S. aureus*'a özgü litik fajların ve faj kokteyllerinin et ve süt ürünlerinde biyokontrol ajanı olarak değerlendirilmesi üzerine çok sayıda çalışma

yürütülmüştür. Tek faj uygulamalarında, sosis ve işlenmiş et ürünlerinde 1-3 log düzeyinde azalma sağlanabildiği bildirilmiştir. Örneğin, Kayvirus grubuna ait litik fajların işlenmiş et ürünlerinde *S. aureus* popülasyonunu anlamlı düzeyde baskılayabildiği rapor edilmiştir (Yan vd., 2021).

Son yıllarda karakterize edilen litik fajlardan biri olan vB_SaRS_FS19-1, sosis ve süt örneklerinde MOI 0,01-100 aralığında uygulandığında *S. aureus* popülasyonunda anlamlı azalma sağlamış ve geniş konakçı aralığı göstermiştir. Bu fajın pH 4-10 ve 20-50 °C aralığında stabil kalabilmesi, farklı işleme koşullarında uygulanabilirliğini desteklemektedir (Yao vd., 2025).

Çoklu faj kokteyllerinin kullanıldığı çalışmalarda ise 2-4 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlanabildiği; faj kombinasyonlarının farklı hedeflere yönelmesi sayesinde heterojen *S. aureus* popülasyonlarında daha tutarlı sonuçlar verebildiği ve direnç gelişimini geciktirmeye katkı sunabildiği bildirilmektedir (Weng vd., 2021; Yao vd., 2025). Ayrıca fajların nisin gibi geleneksel koruyucularla birlikte uygulanması durumunda sinerjik etki oluşabildiği ve tek başına uygulamalara kıyasla daha yüksek düzeyde azalma sağladığı raporlanmıştır (Duc vd., 2020; Yan vd., 2021). Bu tür kombine uygulamalar, özellikle işlenmiş et ürünlerinde “engeller teknolojisi” yaklaşımı kapsamında değerlendirildiğinde önemli avantajlar sunmaktadır (Suja & Gummadi, 2024)

Bütün bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, *S. aureus*’a karşı geliştirilen litik fajların etkinliğinin uygulama stratejisine ve gıda matriksine bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği; uygun koşullarda 1 ila 4 log düzeyinde mikrobiyal baskılama sağlayabildiği ve mastitis kaynaklı kontaminasyon riskinin yüksek olabileceği üretim zincirlerinde faj temelli biyokontrol yaklaşımlarının tamamlayıcı bir seçenek olarak öne çıktığı anlaşılmaktadır (Yan vd., 2021; Yao vd., 2025).

4.6. *Pseudomonas* spp.’nin Kontrolünde Faj Uygulamaları

Pseudomonas spp., özellikle *P. fluorescens* başta olmak üzere, soğukta depolanan taze et ve kanatlı ürünlerinde baskın bozulma mikroorganizmaları arasında yer almaktadır. Bu bakteriler proteolitik ve lipolitik enzimler üreterek protein ve lipid yıkımına neden olmakta; uçucu bazik azot bileşikleri, biyojen aminler ve kötü kokuya yol açan metabolitler oluşturarak ürünün duyu kalitesini hızla düşürmektedir. Bu nedenle *Pseudomonas* kontrolü, yalnızca mikrobiyolojik güvenlik açısından değil, raf ömrü ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından da kritik öneme sahiptir (Hu vd., 2025; Hungaro vd., 2013).

Son yıllarda *Pseudomonas* türlerine özgü litik fajların raf ömrünü uzatmaya yönelik biyokontrol ajanı olarak kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Soğutulmuş tavuk ve sığır etlerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, *Pseudomonas* fajlarının uygulama sonrası 1-3 log düzeyinde *Pseudomonas*

popülasyonunda azalma sağlayabildiği ve bu etkisini soğuk depolama boyunca da kısmen sürdürülebildiği rapor edilmiştir (Guan vd., 2025; Hu vd., 2025).

Kesimhane ortamlarından izole edilen ve P1, P9 ve P20 olarak adlandırılan litik fajların, 4-40 °C sıcaklık aralığında stabil kaldığı ve optimal MOI koşullarında kısa latent dönem gösterdiği bildirilmiştir. Bu fajların soğutulmuş tavuk etinde *Pseudomonas* gelişimini baskılayarak raf ömrünü birkaç gün uzatabildiği belirtilmektedir. Ayrıca bu fajların genomik analizlerinde toksin, virülans veya lizogenik gen taşımadıkları gösterilmiş ve gıda uygulamaları açısından güvenli oldukları vurgulanmıştır (Costa vd., 2023; Hu vd., 2025).

Faj temelli kontrol stratejilerine ek olarak, faj türevli enzimler de dikkat çekmektedir. Örneğin, *P. fluorescens*'e karşı geliştirilen endolizin LysPFX32, hem planktonik hücrelerde hem de biyofilm yapılarında etkili bulunmuş; et örneklerinde yaklaşık 1-2 log düzeyinde azalma sağlamış ve depolama süresince amin oluşumunu azaltarak kaliteyi korumuştur. Endolizin uygulamalarının etin renk ve tekstür özelliklerinde anlamlı bir değişime yol açmadığı bildirilmiştir (Guan vd., 2025). Ayrıca bazı çalışmalarda fajların modifiye atmosfer paketlenme (MAP), düşük sıcaklık uygulamaları veya doğal antimikrobiallarla birlikte kullanılması durumunda sinerjik etki oluştuğu ve mikrobiyal büyümenin daha etkin biçimde baskılandığı gösterilmiştir. Bu tür kombine uygulamalar, raf ömrü uzatma stratejileri kapsamında “engeller teknolojisi” yaklaşımıyla uyumlu bir çözüm sunmaktadır (Suja & Gummedi, 2024).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, *Pseudomonas* spp.'ye karşı geliştirilen fajların etkinliğinin 1 ila 3 log düzeyinde değişebildiği; ancak asıl katkılarının mikrobiyal büyüme hızını yavaşlatarak duyu kalite kaybını geciktirmek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, fajların yalnızca patojen kontrolünde değil, aynı zamanda kalite ve raf ömrü yönetiminde de yenilikçi bir biyoteknolojik araç olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

4.7. Diğer Gıda Kaynaklı Bakteriler ve Gelecek Uygulama Alanları

Et ve et ürünlerinde yaygın olarak çalışılan başlıca patojenlere ek olarak, farklı gıda kaynaklı bakterilere karşı da faj temelli biyokontrol uygulamaları değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar, fajların yalnızca belirli birkaç patojenle sınırlı olmadığını, farklı mikrobiyal gruplara karşı da uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Yersinia enterocolitica, özellikle domuz etiyle ilişkilendirilen ve soğukta çoğalabilme yeteneğine sahip bir patojendir. Domuz eti yüzeyinde uygulanan litik *Yersinia* fajlarının yaklaşık 1-3 log düzeyinde mikrobiyal azalma sağlayabildiği bildirilmiştir. Bazı çalışmalarda yüksek MOI değerleri kullanıldığında 3 log'a yaklaşan azalma elde edilmiş ve etkinliğin soğuk depolama süresince korunabildiği gösterilmiştir. Bu bulgular, düşük sıcaklıkta

depolanan et ürünlerinde faj uygulamalarının potansiyelini ortaya koymaktadır (Jun, Park, Wicklund, & Skurnik, 2018; Leon-Velarde, Jun, & Skurnik, 2019).

Spor oluşturan bir patojen olan *C. perfringens*, özellikle pişmiş ve yavaş soğutulmuş et ürünlerinde risk oluşturmaktadır. Bu bakteriye özgü litik fajların vejetatif hücrelere karşı etkili olduğu; sıvı kültür ortamlarında ve model gıda sistemlerinde yaklaşık 1-2 log düzeyinde azalma sağlayabildiği rapor edilmiştir. Ancak spor formuna karşı doğrudan etkili olmamaları nedeniyle faj uygulamalarının ısıtma işlem ve hızlı soğutma gibi kontrol stratejileriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Endersen vd., 2014; Venhorst, van der Vossen, & Agamennone, 2022).

Bacillus cereus hem toksin üretimi hem de spor oluşturma yeteneği nedeniyle et ürünlerinde risk oluşturmaktadır. Bu bakteriye etkili olan bazı litik fajların vejetatif hücre popülasyonunda 2-3 log düzeyinde azalma sağlayabildiği bildirilmiştir. Ayrıca faj uygulamalarının biyofilm oluşumunu baskılayabildiği ve özellikle işleme yüzeylerinde mikrobiyal yükü azaltabildiği gösterilmiştir (Sajjad vd., 2025).

Et ve et ürünlerinde raf ömrünü sınırlayan önemli bozulma bakterilerinden biri olan *Brochothrix thermosphacta*'ya karşı yapılan çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, özgül fajların soğukta depolanan et örneklerinde mikrobiyal büyümeyi baskılayabildiği bildirilmiştir. Bu uygulamalarda 1-2 log düzeyinde popülasyon azalması ve bozulma hızında gecikme rapor edilmiştir (Greer, 2005).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, fajların yalnızca yaygın patojenlere karşı değil; daha az çalışılmış ancak et ürünleriyle ilişkili diğer bakterilere karşı da uygulanabilir olduğu görülmektedir. Farklı bakteriyel türlerde gözlenen mikrobiyal azalma düzeylerinin genellikle 1-3 log aralığında değiştiği; etkinliğin uygulama dozu, konakçı özgüllüğü ve ürün matrisine bağlı olarak farklılık gösterebildiği anlaşılmaktadır.

4.8. Faj Kokteylleri ve Kombine Uygulamalar

Tekil faj uygulamaları yüksek konakçı özgüllüğü sayesinde hedef bakteriyi seçici biçimde elimine edebilmekte; ancak dar konak aralığı ve bakterilerin reseptör modifikasyonu, CRISPR-Cas sistemleri veya tam gelişmeyen enfeksiyon mekanizmaları yoluyla faj direnci geliştirebilmesi önemli sınırlılıklar arasında yer almaktadır. Bu nedenle farklı konak reseptörlerini hedefleyen birden fazla litik fajın bir araya getirilmesiyle oluşturulan faj kokteylleri, et ve et ürünlerinde biyokontrol uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Galarce vd., 2016; Hungaro vd., 2013; Raj, 2022)

Faj kokteyllerinde yer alan fajların konak aralıklarının birbirinden farklı olması, heterojen bakteri popülasyonlarının daha geniş kapsamlı baskılanmasına olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca farklı serotiplerin eş zamanlı

kontrolünü sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda tek bir faja karşı gelişebilecek direnç oluşumunu da geciktirmektedir. Özellikle *Salmonella*, *E. coli* O157:H7 ve *S. aureus* inhibisyon çalışmalarında çoklu faj uygulamalarının tek faja kıyasla daha yüksek ve daha kalıcı mikrobiyal azalma sağladığı bildirilmiştir (Evrans vd., 2022).

Son yıllarda kokteyl etkinliğini artırmak amacıyla fajların konak aralığını genişletmeye yönelik adaptif evrim temelli yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Örneğin, Appelmans protokolü kullanılarak eğitilmiş faj kokteyllerinin başlangıç formülasyonlarına kıyasla daha geniş bakteri kapsama alanı sağladığı ve planktonik kültürlerde daha güçlü inhibisyon gösterdiği rapor edilmiştir (Berhilevych vd., 2026). Bu tür rasyonel tasarım yaklaşımları, endüstriyel uygulamalarda daha tutarlı performans elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

Faj kokteyllerinin etkinliği, diğer muhafaza stratejileriyle kombine edildiğinde daha da artabilmektedir. Organik asit uygulamaları, düşük sıcaklıkta depolama, MAP, doğal antimikrobiyaller ve bazı durumlarda nisin gibi bakteriyosinlerle birlikte kullanıldığında sinerjik etki olduğu gösterilmiştir (Costa, Pastrana, Teixeira, Sillankorva, & Cerqueira, 2023; Rodríguez-Marcia vd., 2025; Tang vd., 2023). Bu kombine yaklaşımlar, “engeller teknolojisi” kapsamında değerlendirilmekte ve mikrobiyal büyümenin farklı mekanizmalar üzerinden baskılanmasını mümkün kılmaktadır.

Özellikle düşük sıcaklıkta depolanan et ürünlerinde fajların bakteriyel metabolizmanın yavaşlamasına bağlı olarak çoğalma hızının sınırlanabileceği; ancak doğrudan lizis etkisi sayesinde başlangıç mikrobiyal yükünü azaltabildiği bildirilmektedir. Bu nedenle faj uygulamalarında doz (MOI), temas süresi ve başlangıç bakteri yoğunluğu gibi parametrelerin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır (Cristobal-Cueto vd., 2021; Endersen vd., 2014; Moye vd., 2018).

Genel olarak değerlendirildiğinde, faj kokteylleri ve kombine uygulamalar, tekil faj stratejilerine kıyasla daha geniş kapsama alanı, daha düşük direnç riski ve daha yüksek biyokontrol etkinliği sunmaktadır. Bu yaklaşım, et ve et ürünlerinde faj temelli biyokontrolün pratik ve sürdürülebilir biçimde uygulanabilmesi açısından kritik bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

5. FAJ TÜREVLERİ, TAŞIYICI SİSTEMLER VE AMBALAJ UYGULAMALARI

Faj temelli biyokontrol stratejilerinin etkinliği, yalnızca serbest faj uygulamalarıyla sınırlı kalmamış; faj türevleri ve farklı taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesiyle önemli ölçüde genişlemiştir. Et ve et ürünleri gibi karmaşık gıda matrislerinde fajların stabilitesi, etkinliği ve hedef mikroorganizmalara erişimi çeşitli çevresel faktörler tarafından sınırlanabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar, faj kökenli antimikrobiyal bileşenlerin ve fajların kontrollü

salımını sağlayan taşıyıcı sistemlerin kullanımına odaklanmıştır (Suja & Gummadı, 2024; Talavera-González vd., 2025).

Ayrıca fajların aktif ve akıllı ambalaj sistemlerine entegre edilmesi, yüzey kontaminasyonunun kontrolü ve raf ömrünün uzatılması açısından yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle biyopolimer bazlı ambalaj materyallerine immobilize edilen veya enkapsüle edilen fajların, depolama süresince kontrollü ve hedefe yönelik antimikrobiyal etki sağlayabildiği bildirilmektedir (Lone vd., 2016; Silva Batalha vd., 2021). Bu tür uygulamalar, ambalaj materyalinin yalnızca pasif bir bariyer değil, aynı zamanda aktif bir mikrobiyal kontrol aracı olarak işlev görmesine olanak tanımaktadır.

5.2. Faj Türevleri: Endolizinler ve Diğer Antimikrobiyal Proteinler

Fajların yaşam döngüsünün son aşamasında sentezlenen endolizinler, bakteri hücre duvarındaki peptidoglikan yapıyı parçalayan enzimlerdir. Bu enzimler, özellikle Gram-pozitif bakteriler üzerinde dış ortamdan uygulandıklarında dahi güçlü bakterisidal etki gösterebilmeleri nedeniyle gıda biyokontrolü açısından büyük ilgi görmektedir. *L. monocytogenes* gibi Gram-pozitif patojenlere karşı elde edilen endolizinlerin, et ve et ürünlerinde hızlı ve etkili mikrobiyal inaktivasyon sağlayabildiği bildirilmektedir (Schmelcher & Loessner, 2016).

Endolizinlerin en önemli avantajlarından biri, fajların aksine replikasyona ihtiyaç duymamalarıdır. Bu durum, düşük sıcaklık koşullarında veya bakteriyel metabolizmanın sınırlı olduğu ortamlarda bile etkinlik gösterebilmelerini mümkün kılmaktadır. Ayrıca endolizinlerin yüksek özgülüğü, faydalı mikroorganizmalara zarar verme riskini azaltmaktadır (Oliveira vd., 2016).

Bununla birlikte, Gram-negatif bakterilerde dış membranın varlığı, endolizinlerin peptidoglikan tabakasına doğrudan erişimini engelleyerek etkinliğini sınırlayan temel bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bu sınırlılığı aşmak amacıyla çeşitli mühendislik yaklaşımları geliştirilmiştir. Özellikle dış membranı geçebilecek şekilde tasarlanan artilizinler (engineered endolysins), membran geçirgenliğini artıran peptid dizileriyle füzyonlanmış lizozomal proteinler olup Gram-negatif patojenlere karşı etkinlik göstermektedir. Bunun yanı sıra faj kaynaklı depolimeraz enzimleri, kapsül ve biyofilm matriksini parçalayarak bakteriyel hücrelerin antimikrobiyal ajanlara duyarlılığını artırabilmektedir. Ayrıca virion-associated lysinler (VAL), holin-endolizin sistemleri ve spanin protein kompleksleri gibi faj kökenli diğer litik proteinler de antimikrobiyal ajan olarak değerlendirilmiştir (Briers vd., 2014; Schmelcher & Loessner, 2016).

Bu tür mühendislik temelli yaklaşımların, özellikle *Salmonella* spp. ve *E. coli* O157:H7 gibi Gram-negatif gıda patojenlerine karşı umut verici sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Dış membranı hedefleyen peptid füzyonlu endolizinlerin planktonik

hücrelerde ve biyofilm yapılarında anlamlı mikrobiyal azalma sağlayabildiği; bazı çalışmalarda 2-4 log düzeyinde düşüş elde edildiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, faj türevlerinin yalnızca klasik litik döngüye bağımlı olmaksızın, bağımsız antimikrobiyal proteinler olarak da kullanılabileceğini göstermektedir (Briers vd., 2014; Oliveira vd., 2016; Rodríguez-Rubio, Jofre, & Muniesa, 2017).

5.3. Fajların Taşıyıcı Sistemlerle Birlikte Kullanımı

Serbest fajların gıda matriksinde hızlı inaktivasyonu, düzensiz dağılımı ve çevresel stres faktörlerine duyarlılığı, uygulama etkinliğini sınırlayabilmektedir. Bu nedenle fajların stabilitesini artırmak ve kontrollü salımını sağlamak amacıyla çeşitli taşıyıcı sistemler geliştirilmiştir. Enkapsülasyon, emülsiyonlar, biyopolimer bazlı filmler ve hidrojel, bu amaçla yaygın olarak araştırılan sistemler arasında yer almaktadır (Costa vd., 2026; Costa vd., 2023; Encu vd., 2025).

Enkapsülasyon teknikleri, fajların çevresel streslerden korunmasını ve hedef mikroorganizmalara daha uzun süre etkin şekilde ulaşmasını sağlamaktadır. Et ürünlerinde yapılan çalışmalar, enkapsüle fajların serbest fajlara kıyasla daha uzun süre infektivitesini koruduğunu ve depolama süresi boyunca daha tutarlı biyokontrol sağladığını göstermektedir (Cristobal-Cueto vd., 2021; Efenberger-Szmechtyk & Nowak, 2025).

Biyopolimer bazlı taşıyıcılar, özellikle gıda ile doğrudan temas eden yüzeylerde faj uygulamaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Yenilebilir filmler ve kaplamalar içerisine entegre edilen fajlar, et yüzeyinde patojenlerin çoğalmasını baskılayabilmekte ve raf ömrünü uzatabilmektedir. Bu tür sistemlerin, minimal işlenmiş ve “temiz etiketli” et ürünleri geliştirilmesinde potansiyel bir araç olduğu bildirilmektedir (Costa vd., 2023; Ge vd., 2022).

5.4. Aktif Ambalaj Sistemlerinde Faj Kullanımı

Aktif ambalaj teknolojileri, gıda güvenliği ve raf ömrünü artırmak amacıyla antimikrobiyal bileşenlerin ambalaj materyaline entegre edilmesini temel almaktadır. Fajların veya faj türevlerinin ambalaj materyallerine dahil edilmesi, et ve et ürünlerinde yüzey kontaminasyonunun kontrolü açısından yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Costa vd., 2023).

Faj içeren aktif ambalajların, patojenlerin ambalaj yüzeyinde tutunmasını ve çoğalmasını engelleyerek çapraz kontaminasyon riskini azalttığı bildirilmektedir. Özellikle tüketime hazır et ürünlerinde, ambalaj kaynaklı kontaminasyonun önlenmesi, halk sağlığı açısından kritik önem taşımaktadır (Vikram vd., 2021; Xu, 2021). Fajların ambalaj materyaline entegrasyonunda en yaygın yaklaşımlar; faj partiküllerinin film yüzeyine adsorpsiyon ile tutundurulması, polimer matriks içine enkapsülasyon/dağıtım yoluyla gömülmesi ve yüzey fonksiyonlandırması

sonrası kovalent bağlama ile immobilizasyonudur. Ayrıca elektrosinning gibi yöntemlerle üretilen nanolif ağırları, yüksek yüzey alanı sayesinde fajların taşıyıcı yüzeye daha etkin bağlanmasına ve yüzeyde daha homojen dağılımına olanak sağlayabilmektedir. Seçilen immobilizasyon tekniği; fajın biyolojik aktivitesinin korunması, ambalaj yüzeyinde tutunma gücü ve gıda yüzeyine transfer edilebilirliği üzerinde belirleyici olmaktadır (Lone vd., 2016; Silva Batalha vd., 2021).

Ancak aktif ambalaj sistemlerinde faj kullanımına yönelik bazı teknik ve düzenleyici zorluklar bulunmaktadır. Fajların ambalaj materyaliyle etkileşimi, salım kinetiği ve depolama koşulları altında stabilitesi, sistem tasarımında dikkat edilmesi gereken başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle aktif ambalaj uygulamalarının, faj biyolojisi ve gıda matriksi özellikleri dikkate alınarak optimize edilmesi gerekmektedir (Choi vd., 2025; Costa vd., 2023).

5.5. Et Sistemlerinde Entegre Yaklaşımlar

Faj türevleri ve taşıyıcı sistemlerin, birbirinden bağımsız kullanımları yerine entegre biyokontrol stratejilerinin bir parçası olarak kullanılmaları önerilmektedir. Fajlar, endolizinler, düşük sıcaklık, MAP ve organik asitler gibi farklı engellerin birlikte kullanıldığı “engeller teknolojisi” yaklaşımları, et ürünlerinde daha etkili ve sürdürülebilir mikrobiyal kontrol sağlayabilmektedir (Costa vd., 2023; Vikram vd., 2021).

Bu entegre yaklaşımlar hem patojen baskılanmasını artırmakta hem de tek bir kontrol yöntemine bağlı kalmanın getirdiği sınırlılıkları azaltmaktadır. Böylece faj temelli biyokontrol stratejilerinin endüstriyel uygulamalara uyarlanabilirliği güçlenmektedir (Choi vd., 2025; Xu, 2021).

6. GÜVENLİK, DİRENÇ GELİŞİMİ VE YASAL DÜZENLEMELER

Fajların et ve et ürünlerinde biyokontrol ajanı olarak kullanımının yaygınlaşabilmesi için, etkinlik kadar güvenlik, direnç gelişimi ve yasal düzenlemeler de kritik öneme sahiptir. Fajların doğal kökenli olmaları ve insan hücrelerini enfekte edememeleri önemli bir avantaj olmakla birlikte, gıda sistemlerine bilinçli olarak uygulanmaları bazı bilimsel ve düzenleyici soruları beraberinde getirmektedir (Hagens & Loessner, 2007; Vikram vd., 2021).

6.2. Fajların Güvenlik Profili

Fajlar, doğada yaygın olarak bulunan ve insan beslenmesiyle tarihsel olarak sürekli temas hâlinde olan biyolojik varlıklardır. Et, süt ve fermente gıdalar gibi birçok gıda matriksinde doğal olarak bulunmaları, fajların temel güvenlik profiline dair önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalarda, litik fajların insan hücreleri üzerinde sitotoksik veya genotoksik

etki göstermediği ve bağırsak mikrobiyotası üzerinde minimal değişikliklere yol açtığı bildirilmektedir (Febvre vd., 2019; Sarker vd., 2017).

Gıda biyokontrolünde kullanılacak fajların güvenliği açısından en kritik hususlardan biri, genomlarında toksin geni, virülans faktörü veya antibiyotik direnç geni taşımamalarıdır. Bu nedenle fajların tam genom dizilemesiyle karakterize edilmesi ve genetik içeriklerinin ayrıntılı biçimde analiz edilmesi önerilmektedir. Özellikle lizogenik özellik taşıyan fajların gıda uygulamalarında kullanılmaması gerektiği vurgulanmaktadır (Costa vd., 2023; Hagens & Loessner, 2007).

Faj türevleri olan endolizinler ve diğer faj proteinleri için de benzer güvenlik değerlendirmeleri yapılmaktadır. Bu proteinlerin hedef özgüllüğü yüksek olmakla birlikte, gıda matriksinde stabilitesi ve potansiyel alerjenik etkileri dikkatle incelenmesi gereken konular arasında yer almaktadır (Choi vd., 2025; Xu, 2021).

6.3. Faj Direnci ve Yatay Gen Transferi Riskleri

Bakterilerin fajlara karşı direnç geliştirebilmesi, faj temelli biyokontrol stratejilerinin uzun vadeli etkinliği açısından önemli bir sınırlılık olarak değerlendirilmektedir. Adsorpsiyonun ve genomik materyal enjeksiyonunun engellenmesi, restriksiyon-modifikasyon sistemleri ve CRISPR-Cas mekanizmaları, bakterilerin doğal olarak bulundurduğu ya da sonradan edindiği faj direnç sistemleridir (Sajjad vd., 2025; Vikram vd., 2021).

Et ve ürünlerinde var olan bakterilerde faj direncinin gelişimi, özellikle tekil faj uygulamalarında daha belirgin olabilmektedir. Bu nedenle farklı konakçılardaki bağlanma reseptörlerini hedefleyen fajların bir araya getirilmesiyle oluşturulan faj kokteylleri, direnç gelişimini geciktiren etkili bir strateji olarak önerilmektedir. Ayrıca fajların diğer biyokontrol yöntemleriyle birlikte kullanılması, seçici baskıyı azaltarak direnç riskini düşürebilmektedir (Hungaro vd., 2013; Kim vd., 2020).

Yatay gen transferi potansiyeli, özellikle lizogenik fajlarla ilişkilendirilen bir güvenlik endişesidir. Faj aracılı transdüksiyon yoluyla direnç veya virülans genlerinin yayılması teorik bir risk olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle gıda biyokontrolünde kullanılacak fajların, düşük transdüksiyon frekansına sahip, tamamen litik fajlar arasından seçilmesi gerekmektedir (Costa vd., 2023; Hagens & Loessner, 2007).

6.4. Yasal Düzenlemeler

Fajların gıda güvenliği uygulamalarında kullanımı, ülkeler arasında farklı düzenleyici yaklaşımlara tabidir. Bazı ülkelerde fajlar, “işleme yardımcıları” veya “biyokontrol ajanları” olarak değerlendirilirken, bazı düzenleyici

sistemlerde gıda katkı maddeleri kapsamında ele alınabilmektedir. Bu durum, faj temelli ürünlerin pazara sunulmasını ve endüstriyel ölçekte kullanımını doğrudan etkilemektedir (Costa vd., 2023; Vikram vd., 2021).

Amerika Birleşik Devletleri'nde bazı faj preparatları, FDA tarafından GRAS statüsünde değerlendirilmiş ve belirli gıda kategorilerinde kullanımına izin verilmiştir. Bu kapsamda özellikle *L. monocytogenes*'e karşı geliştirilen Listex™ P100 ve *Salmonella* spp. hedefli SalmoFresh™ gibi ticari ürünler, tüketime hazır et ürünlerinde yüzey uygulamaları için onay almış örnekler arasında yer almaktadır. Buna karşılık Avrupa Birliği'nde faj uygulamalarına yönelik düzenlemeler daha temkinli bir yaklaşım sergilemekte; ülkeler arasında uygulama farklılıkları bulunmakta ve çoğu durumda ürün bazlı değerlendirme yapılmaktadır. Bu durum, faj temelli biyokontrol stratejilerinin küresel ölçekte yaygınlaşmasında mevzuat uyumunun önemli bir belirleyici olduğunu göstermektedir.

Gıda güvenliği otoriteleri tarafından onaylanan faj bazlı ürünlerin sayısı giderek artmakla birlikte, her yeni faj preparatı için güvenlik, etkinlik ve stabiliteye ilişkin ayrıntılı değerlendirme dosyaları talep edilmektedir. Özellikle faj kokteylleri ve aktif ambalaj sistemleri gibi karmaşık uygulamalarda, her bir bileşenin ayrı ayrı karakterize edilmesi ve genomik güvenlik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda faj preparatlarının litik özelliklerinin doğrulanması, virülans ve antibiyotik direnç genleri taşımadığının gösterilmesi ve hedef dışı etkilerinin değerlendirilmesi düzenleyici süreçlerin temel bileşenleri arasında yer almaktadır (Endersen vd., 2014; Fernández-Garcia vd., 2025; Moye vd., 2018).

Yasal düzenlemeler açısından bir diğer önemli konu, tüketici algısıdır. “Virüs” kavramının tüketicilerde olumsuz çağrışımlar oluşturabilmesi, faj temelli ürünlerin kabulünü sınırlayabilmektedir. Bu nedenle bilimsel verilerle desteklenen şeffaf iletişim stratejilerinin geliştirilmesi, faj biyokontrolünün yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamaktadır (Fernández, Rodríguez, & García, 2018; Goodridge & Bisha, 2011).

6.5. Endüstriyel Uygulamalarda Karşılaşılan Zorluklar

Faj temelli biyokontrol stratejilerinin endüstriyel ölçekte uygulanmasında üretim maliyetleri, stabilite, depolama koşulları ve uygulama standardizasyonu gibi teknik zorluklar bulunmaktadır. Fajların büyük ölçekli üretimi sırasında konak bakteri seçimi, saflaştırma yöntemleri, endotoksin uzaklaştırma süreçleri ve kalite kontrol parametreleri ürünün güvenliği ve etkinliği açısından kritik önem taşımaktadır (Hagens & Loessner, 2007; Ishaq, Ebner, Syed, & Ubaid ur Rahman, 2020). Ayrıca yüksek titreli ve stabil faj preparatlarının elde edilmesi, depolama süresince biyolojik aktivitenin korunması açısından önemli bir

gerekliliktir. Özellikle yüksek başlangıç kontaminasyon düzeylerinde etkinlik sağlamak amacıyla yüksek MOI değerlerinin tercih edilmesi, faj üretim hacmini artırarak proses maliyetlerini yükseltebilmekte ve maliyet-etkinlik analizlerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Et ürünlerinin çeşitliliği ve üretim süreçlerinin heterojenliği ise uygulama protokollerinin standartlaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Örneğin, RTE dilimlenmiş et ürünlerinde faj uygulaması genellikle yüzey spreyi şeklinde gerçekleştirilmekte ve etkinlik büyük ölçüde temas süresi ile yüzey dağılımına bağlı olmaktadır. Buna karşılık kıyma ve hamburger gibi homojen ürünlerde fajın ürün matrisi içerisinde eşit dağılımı teknik bir zorluk oluşturmaktadır. Benzer şekilde kanatlı karkaslarında daldırma veya spray sistemleri kullanılırken, MAP altında depolanan ürünlerde gaz kompozisyonunun faj stabilitesi ve bakteriyel büyüme dinamikleri üzerinde etkili olabildiği bildirilmektedir (Anany vd., 2011; Lone vd., 2016). Fermente et ürünlerinde ise düşük pH ve su aktivitesi gibi faktörler faj stabilitesini sınırlayabilmekte; bu nedenle uygulama dozu ve zamanlamasının dikkatle belirlenmesi gerekmektedir. Bu örnekler, faj temelli biyokontrol stratejilerinin ürün tipine ve üretim hattına özgü olarak optimize edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır (Kanaan & Tarek, 2022; Rodríguez-Marca vd., 2025).

7. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Faj temelli biyokontrol stratejileri, et ve et ürünlerinde gıda güvenliğinin sağlanmasına yönelik yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımlar arasında yer almakla birlikte, bu alan hâlen gelişimini sürdürmektedir. Mevcut çalışmalar fajların etkinliğini ortaya koymakla birlikte, endüstriyel uygulamalara tam entegrasyon için daha kapsamlı ve sistematik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecek perspektifleri, faj biyolojisi, mühendislik yaklaşımları, entegre gıda güvenliği sistemleri ve tüketici kabulü ekseninde şekillenmektedir (Costa vd., 2023; Dhulipalla vd., 2025).

7.2. Genomik ve Sentetik Biyoloji Yaklaşımları

Gelecekte faj temelli biyokontrol stratejilerinin geliştirilmesinde genomik analizler ve sentetik biyoloji yaklaşımlarının önemli rol oynaması beklenmektedir. Tam genom dizileme teknolojilerinin yaygınlaşması, fajların genetik içeriklerinin daha hızlı ve detaylı şekilde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede güvenlik açısından risk oluşturabilecek genlerin tespiti ve elenmesi daha etkin biçimde gerçekleştirilebilecektir (Choi vd., 2025; Hagens & Loessner, 2007).

Sentetik biyoloji uygulamaları, fajların konak aralığının genişletilmesi, stabilitesinin artırılması ve çevresel streslere dayanıklılığının iyileştirilmesi

açısından yeni olanaklar sunmaktadır. Genetik olarak modifiye edilmiş fajlar veya faj proteinleri, hedef patojenler üzerinde daha kontrollü ve güçlü inhibisyon sağlama potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte bu tür yaklaşımlar, daha önce bahsedilen güvenlik ve regülasyon boyutlarının dikkatle değerlendirilmesini gerektirmektedir (Garvey, 2022; Xu, 2021).

7.3. Entegre ve Çok Engelli (Hurdle) Sistemlerin Geliştirilmesi

Gelecekte faj temelli biyokontrol stratejilerinin tek başına uygulamalardan ziyade entegre gıda güvenliği sistemlerinin bir parçası hâline gelmesi beklenmektedir. Fajların; düşük sıcaklık, MAP, organik asitler ve biyopolimer bazlı kaplamalar gibi diğer engellerle birlikte kullanılması, et ürünlerinde daha tutarlı ve sürdürülebilir mikrobiyal kontrol sağlayabilmektedir (Costa vd., 2026; Hu vd., 2025).

Bu çok engelli yaklaşımlar hem patojen baskılanmasını artırmakta hem de faj direnç gelişimi riskini azaltmaktadır. Ayrıca ürün kalitesi ve duyu özelliklerinin korunmasına olanak tanınması, endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir (Hu vd., 2025; Rodríguez-Marca vd., 2025).

7.4. Aktif Ambalaj ve Akıllı Gıda Sistemleri

Aktif ve akıllı ambalaj teknolojilerinin gelişimi, faj temelli biyokontrol stratejileri için yeni uygulama alanları yaratmaktadır. Gelecekte fajların veya faj türevlerinin, patojen varlığına yanıt verebilen akıllı ambalaj sistemlerine entegre edilmesi mümkün olabilecektir. Bu tür sistemler, yalnızca mikrobiyal kontrol sağlamakla kalmayıp, gıda güvenliği izleme ve erken uyarı mekanizmaları sunma potansiyeline sahiptir (Costa vd., 2026; Rodríguez-Marca vd., 2025).

Ancak bu uygulamaların hayata geçirilebilmesi için fajların ambalaj materyalleriyle etkileşimi, salım kinetiği ve uzun süreli stabilitesi gibi konuların daha ayrıntılı biçimde araştırılması gerekmektedir. Ayrıca ambalaj bazlı uygulamaların yasal düzenleme boyutları da önemli bir tartışma alanı olarak karşımızda durmaktadır (Atterbury, 2009; Costa vd., 2023).

7.5. Endüstriyel Validasyon, Pilot Ölçekli Çalışmalar ve Ticarileşme Süreçleri

Laboratuvar ölçeğinde elde edilen umut verici sonuçların endüstriyel uygulamalara aktarılabilmesi için pilot ölçekli validasyon çalışmalarının artırılması gerekmektedir. Gerçek üretim koşullarında gerçekleştirilecek çalışmalar; farklı başlangıç kontaminasyon düzeyleri, proses parametreleri ve depolama koşulları altında faj etkinliğinin sürdürülebilirliğini ortaya koymalıdır. Özellikle üretim hattında uygulama noktalarının (karkas yıkama aşaması, yüzey

spreyi, daldırma sistemleri veya paketlenme öncesi uygulamalar gibi) net biçimde tanımlanması, biyokontrol etkinliğinin proses akışıyla uyumlu hâle getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Endersen vd., 2014; Fernández-Garcia vd., 2025).

Endüstriyel validasyon sürecinde yalnızca mikrobiyal azalma düzeyi değil; aynı zamanda ürün kalitesi, duyu özellikler, raf ömrü dinamikleri ve proses maliyetleri de eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir. Özellikle bazı uygulamalarda yüksek MOI gereksinimi, üretilecek faj miktarını artırarak maliyetleri yükseltebilmekte ve ekonomik fizibilite analizlerini zorunlu kılmaktadır. Faj üretim kapasitesi, saflaştırma süreçleri, endotoksin uzaklaştırma adımları ve kalite kontrol kriterleri; laboratuvar verilerinin ticari uygulanabilirliğe dönüştürülmesinde belirleyici faktörler arasında yer almaktadır (Costa vd., 2023; Ishaq vd., 2020; Moye vd., 2018).

Bu nedenle, pilot tesis ölçeğinde gerçekleştirilecek sistematik validasyon çalışmaları; faj preparatlarının gerçek üretim koşullarındaki stabilitesi, etkinliği ve güvenlik profilinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca bu tür çalışmaların, düzenleyici onay süreçlerinde talep edilen bilimsel kanıtların oluşturulmasına katkı sağladığı ve faj temelli biyokontrol stratejilerinin endüstriyel uygulamalara geçişinde önemli bir basamak oluşturduğu bildirilmektedir (Endersen vd., 2014; Singh, Samson, & Hassard, 2025).

7.6. Tüketici Algısı ve İletişim Stratejileri

Faj temelli biyokontrol stratejilerinin geleceği, yalnızca teknik ve bilimsel gelişmelere değil, aynı zamanda tüketici algısına da bağlıdır. “Virüs” kavramının gıda ile ilişkilendirilmesi, tüketicilerde yanlış algılara yol açabilmektedir. Bu nedenle fajların doğal kökeni, hedef özgüllüğü ve güvenlik profili hakkında açık ve bilimsel temelli iletişim stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Fernández vd., 2018; Xu, 2021).

Eğitim ve bilgilendirme faaliyetleri, faj biyokontrolünün kabulünü artırabilecek önemli araçlar olarak değerlendirilmektedir. Bu faaliyetler sayesinde, faj temelli ürünlerin pazarda daha da geniş yer bulacağı öngörülmektedir (Jurač vd., 2019; Vikram vd., 2021).

8. SONUÇ

Et ve et ürünleri, yüksek besin değerleri nedeniyle insan beslenmesinde önemli bir yere sahip olmakla birlikte, gıda kaynaklı patojenlerin gelişimine elverişli yapıları nedeniyle yüksek risk taşıyan ürün grupları arasında yer almaktadır. Geleneksel mikrobiyal kontrol yöntemleri uzun yıllardır etkin biçimde kullanılmasına rağmen, ürün kalitesi üzerindeki olası olumsuz etkileri,

tüketici beklentilerindeki değişim ve antibiyotik direncinin artışı, daha hedefe yönelik ve sürdürülebilir biyokontrol stratejilerine duyulan ihtiyacı artırmıştır.

Bu derlemede sunulan veriler, bakteriyofajların et ve et ürünlerinde patojen kontrolünde seçici ve etkili bir biyolojik araç olduğunu ortaya koymaktadır. Yüksek konak özgüllükleri sayesinde hedef bakterileri baskılayabilmeleri ve faydalı mikrobiyotaya minimal etki göstermeleri, fajları geleneksel yöntemlere kıyasla önemli bir tamamlayıcı veya alternatif yaklaşım hâline getirmektedir. Özellikle *L. monocytogenes*, *Salmonella* spp. ve *E. coli*'ye yönelik çalışmalar, farklı ürün tiplerinde anlamlı mikrobiyal azalmalar sağlanabildiğini göstermektedir.

Serbest faj uygulamalarına ilişkin teknik sınırlılıklar ise faj türevleri ve taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesiyle büyük ölçüde aşılabilmektedir. Endolizinler, mühendislik temelli faj proteinleri, biyopolimer bazlı sistemler ve aktif ambalaj uygulamaları, faj temelli biyokontrolün etkinliğini ve uygulanabilirliğini artıran yenilikçi yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler yalnızca patojen kontrolünü desteklemekle kalmayıp raf ömrünün uzatılması ve ürün kalitesinin korunmasına da katkı sağlayabilmektedir.

Faj temelli stratejilerin gıda endüstrisinde yaygınlaşabilmesi için güvenlik değerlendirmelerinin titizlikle yürütülmesi, litik özellikte ve tam genom analizleriyle karakterize edilmiş fajların tercih edilmesi, direnç gelişiminin izlenmesi ve üretim süreçlerinin standardize edilmesi gerekmektedir. Endüstriyel ölçekte uygulama için kalite kontrol parametrelerinin belirlenmesi ve ürün tipine özgü protokollerin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu tarihsel ve küresel gelişim, faj temelli uygulamaların yalnızca deneysel bir yaklaşım değil, giderek kurumsallaşan bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Fajların 1920'li yıllardan itibaren özellikle Gürcistan'da insan, hayvan ve bitki sağlığı alanlarında kullanıldığı; zamanla Doğu Avrupa ülkeleri başta olmak üzere farklı coğrafyalarda uygulama alanı bulduğu görülmektedir. Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Avrupa ülkeleri, Rusya ve Çin dâhil olmak üzere birçok ülkede faj temelli uygulamalar araştırma ve uygulama düzeyinde değerlendirilmektedir. Ticari olarak üretilen faj preparatlarının sayısının giderek artması, bu teknolojinin küresel ölçekte kabul görmeye başladığını göstermektedir.

Türkiye'de ise son yıllarda bitki sağlığı (2024) ve hayvan sağlığı (2025) alanlarında faj kullanımına ilişkin mevzuat düzenlemelerinin yürürlüğe girmesi önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, gıda, dezenfeksiyon ve tıbbi kullanım alanlarında faj uygulamalarına yönelik yasal çerçeve henüz netleşmemiştir. Bu durum, ilerleyen dönemlerde yapılacak düzenlemelerle birlikte faj temelli biyokontrol stratejilerinin gıda sektöründe daha geniş bir uygulama alanı bulabileceğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak, faj temelli biyokontrol yaklaşımları; et ve et ürünlerinde gıda güvenliğinin artırılmasına yönelik yenilikçi, evre dostu ve tüketicilerle uyumlu bir çözüm sunmaktadır. Mevcut bilimsel veriler, fajların geleneksel yöntemleri tamamlayıcı ve bazı durumlarda alternatif bir araç olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Akademi-sanayi iş birlikleri ve düzenleyici süreçlerin netleşmesiyle birlikte, faj temelli biyokontrol stratejilerinin et endüstrisinde daha sistematik ve yaygın biçimde uygulanması mümkün görünmektedir.

KAYNAKLAR

- Abd-El Wahab, A., Basiouni, S., El-Seedi, H. R., Ahmed, M. F. E., Bielke, L. R., Hargis, B., ... Visscher, C. (2023). An overview of the use of bacteriophages in the poultry industry: Successes, challenges, and possibilities for overcoming breakdowns. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1136638. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1136638>
- Aguilera, M., Martínez, S., Tello, M., Gallardo, M. J., & García, V. (2022). Use of Cocktail of Bacteriophage for *Salmonella* Typhimurium Control in Chicken Meat. *Foods*, 11, 1164. <https://doi.org/10.3390/foods11081164>
- Ahmad, M., Sajjad, W., UR Rehman, M., Abdullah, S. H., Muhammad Tariq Saeed, H., & Chowdhury, A. S. (2025). Systems Microbiology Approach to Meat-Borne Pathogen-Phage Interactions: Decoding Evolutionary Arms Race, Antibiotic Resistance Modulation, and Precision Biocontrol Potential. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 15(3), 60-75. <https://doi.org/10.26502/ijpaes.4490178>
- Ahmadi, H., Barbut, S., Lim, L. T., & Balamurugan, S. (2020). Examination of the Use of Bacteriophage as an Additive and Determining Its Best Application Method to Control *Listeria monocytogenes* in a Cooked-Meat Model System. *Frontiers in Microbiology*, 11, 779. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00779>
- Anany, H., Chen, W., Pelton, R., & Griffiths, M. W. (2011). Biocontrol of *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 in meat by using phages immobilized on modified cellulose membranes. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(18), 6379-6387. <https://doi.org/10.1128/AEM.05493-11>
- Anjay, Kumar, A., Abhishek, Malik, H., Dubal, Z. B., Jaiswal, R. K., ... Agarwal, R. K. (2022). Isolation and characterization of *Salmonella* phages and phage cocktail mediated biocontrol of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium in chicken meat. *LWT*, 155, 112957. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112957>
- Atterbury, R. J. (2009). Bacteriophage biocontrol in animals and meat products. *Microbial Biotechnology*, 2(6), 601-612. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00089.x>
- Berhilevych, O., Peh, E., Vahle, J. C., Plötz, M., & Kittler, S. (2026). Phage-based biocontrol of *Salmonella* and *E. coli* in raw chicken filets: optimizing phage-based solutions to enhance food safety under cooled storing conditions. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1696826. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1696826>
- Bigot, B., Lee, W. J., McIntyre, L., Wilson, T., Hudson, J. A., Billington, C., & Heinemann, J. A. (2011). Control of *Listeria monocytogenes* growth in a ready-to-eat poultry product using a bacteriophage. *Food Microbiology*, 28, 1448-1452. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.07.001>

- Briers, Y., Walmagh, M., Van Puyenbroeck, V., Cornelissen, A., Cenens, W., Aertsen, A., ... Lavigne, R. (2014). Engineered endolysin-based "Artilynsins" to combat multidrug-resistant gram-negative pathogens. *mBio*, 5(4), e01379-14. <https://doi.org/10.1128/mBio.01379-14>
- Carlton, R. M., Noordman, W. H., Biswas, B., De Meester, E. D., & Loessner, M. J. (2005). Bacteriophage P100 for control of *Listeria monocytogenes* in foods: Genome sequence, bioinformatic analyses, oral toxicity study, and application. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 43, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2005.08.005>
- Choi, D., Ryu, S., & Kong, M. (2025). Phage-derived proteins: Advancing food safety through biocontrol and detection of foodborne pathogens. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70124. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70124>
- Costa, J. C. C. P., Entezari, A., Morcillo-Martín, R., Bolívar, A., Possas, A., Rincón, E., ... Pérez-Rodríguez, F. (2026). Biocontrol of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis in raw meat using bacteriophage-loaded gelatine-pullulan composite films incorporating cellulose nanofibers. *Food Microbiology*, 137, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2025.105012>
- Costa, M J, Pastrana, L. M., Teixeira, J. A., Sillankorva, S. M., & Cerqueira, M. A. (2023). Bacteriophage Delivery Systems for Food Applications: Opportunities and Perspectives. *Viruses*, 15, 1271. <https://doi.org/10.3390/v15061271>
- Costa, Maria J., Pastrana, L. M., Teixeira, J. A., Sillankorva, S. M., & Cerqueira, M. A. (2023). Bacteriophage Delivery Systems for Food Applications: Opportunities and Perspectives. *Viruses*, 15, 1271. <https://doi.org/10.3390/v15061271>
- Cristobal-Cueto, P., García-Quintanilla, A., Esteban, J., & García-Quintanilla, M. (2021). Phages in food industry biocontrol and bioremediation. *Antibiotics*, 10, 786. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10070786>
- Dhulipalla, H., Basavegowda, N., Haldar, D., Syed, I., Ghosh, P., Rana, S. S., ... Baek, K. (2025). Integrating phage biocontrol in food production: industrial implications and regulatory overview. *Discover Applied Sciences*, 7(4), 314. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06754-3>
- Duc, H. M., Son, H. M., Ngan, P. H., Sato, J., Masuda, Y., Honjoh, K. ichi, & Miyamoto, T. (2020). Isolation and application of bacteriophages alone or in combination with nisin against planktonic and biofilm cells of *Staphylococcus aureus*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 5145-5158. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10581-4>

- Dülger, M. M., & Özpinar, H. (2021). Use of Bacteriophages to Improve Food Safety. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 15, 705-712. <https://doi.org/10.38079/igusabder.1004988>
- Efenberger-Szmechtyk, M., & Nowak, A. (2025). Bacteriophage Power: Next-Gen Biocontrol Strategies for Safer Meat. *Molecules*, 30(17), 3641. <https://doi.org/10.3390/molecules30173641>
- El-Shibiny, A., Scott, A., Timms, A., Metawea, Y., Connerton, P., & Connerton, I. (2009). Application of a Group II *Campylobacter* Bacteriophage To Reduce Strains of *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* Colonizing Broiler Chickens. *Journal of Food Protection*, 72(4), 733-740.
- Encu, Ş. B., Acar Soykut, E., & Çakır, İ. (2025). Probiyotik, Starter Kültür ve Bakteriyofajlarda Mikroenkapsülasyon Tekniklerinin Kullanımı ve Güncel Gıda Uygulamaları. *Gıda*, 50(5), 929-945. <https://doi.org/10.15237/gida.GD25119>
- Endersen, L., O'Mahony, J., Hill, C., Ross, R. P., McAuliffe, O., & Coffey, A. (2014). Phage therapy in the food industry. *Annual Review of Food Science and Technology*, 5, 327-349. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030713-092415>
- Evran, S., Tayyarcı, E. K., Acar-Soykut, E., & Boyacı, I. H. (2022). Applications of Bacteriophage Cocktails to Reduce *Salmonella* Contamination in Poultry Farms. *Food and Environmental Virology*, 14, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12560-021-09501-0>
- Febvre, H. P., Rao, S., Gindin, M., Goodwin, N. D. M., Finer, E., Vivanco, J. S., ... Weir, T. L. (2019). PHAGE study: Effects of supplemental bacteriophage intake on inflammation and gut microbiota in healthy adults. *Nutrients*, 11, 666. <https://doi.org/10.3390/nu11030666>
- Fernández, L., Rodríguez, A., & García, P. (2018). Phage or foe: An insight into the impact of viral predation on microbial communities. *ISME Journal*, 12, 1171-1179. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0049-5>
- Fernández-García, L., Blasco, L., Bleriot, I., Arman, L., Ibarguren-Quiles, C., Barrio-Pujante, A., ... Tomas, M. (2025). Phages and quorum sensing: findings to consider in phage therapy. *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*. <https://doi.org/10.1007/s10096-025-05375-3>
- Galarce, N., Escobar, B., Rojas, V., Navarro, C., Turra, G., Robeson, J., & Borie, C. (2016). Application of a virulent bacteriophage cocktail leads to reduction of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis counts in processed meat products. *Biocontrol Science and Technology*, 26(4), 462-475. <https://doi.org/10.1080/09583157.2015.1125447>

- Garvey, M. (2022). Bacteriophages and Food Production: Biocontrol and Bio-Preservation Options for Food Safety. *Antibiotics*, 11, 1324. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11101324>
- Ge, H., Fu, S., Guo, H., Hu, M., Xu, Z., Zhou, X., ... Jiao, X. (2022). Application and challenge of bacteriophage in the food protection. *International Journal of Food Microbiology*, 380, 109872. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109872>
- Gencay, Y. E., Ayaz, N. D., Copuroglu, G., & Erol, I. (2016). Biocontrol of Shiga Toxigenic *Escherichia coli* O157:H7 in Turkish Raw Meatball by Bacteriophage. *Journal of Food Safety*, 36(1), 120-131. <https://doi.org/10.1111/jfs.12219>
- Goodridge, L. D., & Bisha, B. (2011). Phage-based biocontrol strategies to reduce foodborne pathogens in foods. *Bacteriophage*, 1(3), 130-137. <https://doi.org/10.4161/bact.1.3.17629>
- Greer, G. G. (2005). Bacteriophage Control of Foodborne Bacteria. *Journal of Food Protection*, 68(5), 1102-1111. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-68.5.1102>
- Guan, P., Ming, Z., Liu, X., Shao, Y., Pan, H., Ding, Y., & Wang, X. (2025). Expression and characterization of a novel endolysin LysPFX32 as potential biological antimicrobial agent against *Pseudomonas fluorescens* for pork preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 294, 139448. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139448>
- Guenther, S., Huwyler, D., Richard, S., & Loessner, M. J. (2009). Virulent bacteriophage for efficient biocontrol of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(1), 93-100. <https://doi.org/10.1128/AEM.01711-08>
- Hagens, S., & Loessner, M. J. (2007). Application of bacteriophages for detection and control of foodborne pathogens. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76, 513-519. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1031-8>
- Hennekinne, J. A., De Buyser, M. L., & Dragacci, S. (2012). *Staphylococcus aureus* and its food poisoning toxins: Characterization and outbreak investigation. *FEMS Microbiology Reviews*, 36, 815-836. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00311.x>
- Holzer, K., Marongiu, L., Detert, K., Venturelli, S., Schmidt, H., & Hoelzle, L. E. (2025). Phage applications for biocontrol of enterohemorrhagic *E. coli* O157:H7 and other Shiga toxin-producing *Escherichia coli*. *International Journal of Food Microbiology*, 439, 111267. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111267>
- Hu, H., Cai, L., Shao, L., Xu, X., Wang, H., & Zhou, G. (2025). Characterization and genome analysis of *Pseudomonas* phages isolated from various sources

- related to chilled chicken. *Food Research International*, 202, 115544. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115544>
- Hudson, J. A., Billington, C., Carey-Smith, G., & Greening, G. (2005). Bacteriophages as Biocontrol Agents in Food. *Journal of Food Protection*, 68(2), 426-437. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.2.426>
- Hungaro, H. M., Mendonça, R. C. S., Gouvêa, D. M., Vanetti, M. C. D., & Pinto, C. L. de O. (2013). Use of bacteriophages to reduce *Salmonella* in chicken skin in comparison with chemical agents. *Food Research International*, 52, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.032>
- Ishaq, A., Ebner, P. D., Syed, Q. A., & Ubaid ur Rahman, H. (2020). Employing list-shield bacteriophage as a bio-control intervention for *Listeria monocytogenes* from raw beef surface and maintain meat quality during refrigeration storage. *LWT*, 132, 109784. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109784>
- Islas Vega, I., Rodríguez, N. E. R., Pérez, V. J. A., Velázquez, A. P. Z., Sánchez, V. V., Arana, J. L. D. L. R., ... Gómez De Anda, F. R. (2025). Bacteriophages as a Biocontrol Strategy to Prevent the Contamination of Meat Products with *Escherichia coli* - A Meta-Analysis. *Polish Journal of Microbiology*, 74(2), 165-176. <https://doi.org/10.33073/pjm-2025-014>
- Jun, J. W., Park, S. C., Wicklund, A., & Skurnik, M. (2018). Bacteriophages reduce *Yersinia enterocolitica* contamination of food and kitchenware. *International Journal of Food Microbiology*, 271, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.02.007>
- Jurač, K., Nabergoj, D., & Podgornik, A. (2019). Bacteriophage production processes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(2), 685-694. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9527-y>
- Kadariya, J., Smith, T. C., & Thapaliya, D. (2014). *Staphylococcus aureus* and Staphylococcal Food-Borne Disease: An Ongoing Challenge in Public Health. *BioMed Research International*, 2014, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2014/827965>
- Kanaan, M. H. G., & Tarek, A. M. (2022). Innovative modern bio-preservation module of meat by lytic bacteriophages against emergent contaminants. *Open Veterinary Journal*, 12(6), 1018-1026. <https://doi.org/10.5455/OVJ.2022.v12.i6.30>
- Kim, J. H., Kim, H. J., Jung, S. J., Mizan, M. F. R., Park, S. H., & Ha, S. Do. (2020). Characterization of *Salmonella* spp.-specific bacteriophages and their biocontrol application in chicken breast meat. *Journal of Food Science*, 85(3), 526-534. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15042>
- Komora, N., Maciel, C., Amaral, R. A., Fernandes, R., Castro, S. M., Saraiva, J. A., & Teixeira, P. (2021). Innovative hurdle system towards *Listeria*

- monocytogenes* inactivation in a fermented meat sausage model - high pressure processing assisted by bacteriophage P100 and bacteriocinogenic *Pediococcus acidilactici*. *Food Research International*, 148, 110628. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110628>
- Leon-Velarde, C. G., Jun, J. W., & Skurnik, M. (2019). *Yersinia* phages and food safety. *Viruses*, 11, 1105. <https://doi.org/10.3390/v11121105>
- Li, S., Konoval, H. M., Marecek, S., Lathrop, A. A., Feng, S., & Pokharel, S. (2023). Control of *Escherichia coli* O157:H7 using lytic bacteriophage and lactic acid on marinated and tenderized raw pork loins. *Meat Science*, 196, 109030. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109030>
- Liu, L., Mao, P., Chen, J., Li, L., Wang, Y., Song, J., ... Ye, C. (2025). Isolation, characterization and genomic analysis of the novel *Listeria* bacteriophage LMLPA3 as a potential antimicrobial in foods. *Food Microbiology*, 128, 104720. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2024.104720>
- Loc Carrillo, C., Atterbury, R. J., El-Shibiny, A., Connerton, P. L., Dillon, E., Scott, A., & Connerton, I. F. (2005). Bacteriophage therapy to reduce *Campylobacter jejuni* colonization of broiler chickens. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(11), 6554-6563. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.6554-6563.2005>
- Lone, A., Anany, H., Hakeem, M., Aguis, L., Avdjian, A. C., Bouget, M., ... Griffiths, M. W. (2016). Development of prototypes of bioactive packaging materials based on immobilized bacteriophages for control of growth of bacterial pathogens in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 217, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.10.011>
- Montañez-Izquierdo, V. Y., Salas-Vázquez, D. I., & Rodríguez-Jerez, J. J. (2012). Use of epifluorescence microscopy to assess the effectiveness of phage P100 in controlling *Listeria monocytogenes* biofilms on stainless steel surfaces. *Food Control*, 23, 470-477. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.016>
- Moon, S. H., Waite-Cusic, J., & Huang, E. (2020). Control of *Salmonella* in chicken meat using a combination of a commercial bacteriophage and plant-based essential oils. *Food Control*, 110, 106984. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106984>
- Moye, Z. D., Woolston, J., & Sulakvelidze, A. (2018). Bacteriophage applications for food production and processing. *Viruses*, 10, 205. <https://doi.org/10.3390/v10040205>
- Nam, G., Kim, J., Kim, S., Kim, H., Shin, H., & Son, B. (2025). Development of a novel three-bacteriophage cocktail for controlling Enterohemorrhagic *Escherichia coli* in iceberg lettuce and chicken-based sliced ham. *LWT*, 234, 118607. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118607>

- Oliveira, H., Boas, D. V., Mesnage, S., Kluskens, L. D., Lavigne, R., Sillankorva, S., ... Azeredo, J. (2016). Structural and enzymatic characterization of ABgp46, a novel phage endolysin with broad anti-gram-negative bacterial activity. *Frontiers in Microbiology*, 7, 208. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00208>
- Pelyuntha, W., & Vongkamjan, K. (2023). Control of *Salmonella* in Chicken Meat by a Phage Cocktail in Combination with Propionic Acid and Modified Atmosphere Packaging. *Foods*, 12(22), 4181. <https://doi.org/10.3390/foods12224181>
- Rafiq, M. S., Chen, J., Akmal, M., Ma, D., Asif, A., Wang, J., ... Hao, H. (2025). Characterization and application of a novel *Campylobacter* phage CC_R7 as a biocontrol agent in chicken meat. *Current Research in Food Science*, 11, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101182>
- Raj, M. (2022). Biocontrol of *Escherichia coli* and *Salmonella* in poultry meat using phage cocktail. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 23(3), 270-274. <https://doi.org/10.22099/IJVR.2022.41490.6030>
- Rodríguez-Marca, C., Domenech-Coca, C., Nakamura, M., Ortega-Olivé, N., & Puigbò, P. (2025). Use of Live Biopreservatives and Bacteriophages to Enhance the Safety of Meat Products. *Life*, 15, 197. <https://doi.org/10.3390/life15020197>
- Rodríguez-Rubio, L., Jofre, J., & Muniesa, M. (2017). Is genetic mobilization considered when using bacteriophages in antimicrobial therapy? *Antibiotics*, 6, 32. <https://doi.org/10.3390/antibiotics6040032>
- Sajjad, W., Ahmad, M., Waqar, A., & Mehaisi, D. (2025). A Multidisciplinary Approach to Understanding *Bacillus cereus* in Fresh Meat: Isolation, Biochemical and Molecular Characterization, and Bacteriophages-Mediated Control Strategies for Improved Food Safety and Public Health. *SVOA Microbiology*, 6(3), 102-117. <https://doi.org/10.58624/svoamb.2025.06.013>
- Sarker, S. A., Berger, B., Deng, Y., Kieser, S., Foata, F., Moine, D., ... Brüssow, H. (2017). Oral application of *Escherichia coli* bacteriophage: safety tests in healthy and diarrheal children from Bangladesh. *Environmental Microbiology*, 19(1), 237-250. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13574>
- Schmelcher, M., & Loessner, M. J. (2016). Bacteriophage endolysins: Applications for food safety. *Current Opinion in Biotechnology*, 37, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.10.005>
- Seo, J., Seo, D. J., Oh, H., Jeon, S. B., Oh, M. H., & Choi, C. (2016). Inhibiting the growth of *Escherichia coli* O157:H7 in beef, pork, and chicken meat using a bacteriophage. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 36(2), 186-193. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.2.186>
- Silva Batalha, L., Pardini Gontijo, M. T., Vianna Novaes de Carvalho Teixeira, A., Meireles Gouvêa Boggione, D., Soto Lopez, M. E., Renon Eller, M., &

- Santos Mendonça, R. C. (2021). Encapsulation in alginate-polymers improves stability and allows controlled release of the UFV-AREG1 bacteriophage. *Food Research International*, 139, 109947. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109947>
- Singh, S., Samson, R., & Hassard, F. (2025). Phage therapy for environmental biotechnology applications. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1621103. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1621103>
- Suja, E., & Gummadi, S. N. (2024). Advances in the applications of Bacteriophages and phage products against food-contaminating bacteria. *Critical Reviews in Microbiology*, 50(5), 702-727. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2023.2271098>
- Talavera-González, J. M., Talavera-Rojas, M., Vega-Sánchez, V., & Varela-Guerrero, J. A. (2025). The use of bacteriophages in food safety and pathogen control. Review. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuaria*, 16(2), 402-427. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v16i2.6737>
- Tang, Y. jei, Yuan, L., Chen, C. wei, Tang, A. qi, Zhou, W. yuan, & Yang, Z. quan. (2023). Isolation and characterization of the new isolated bacteriophage YZU-L1 against *Citrobacter freundii* from a package-swelling of meat product. *Microbial Pathogenesis*, 179, 106098. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2023.106098>
- Tokman, J. I., Kent, D. J., Wiedmann, M., & Denes, T. (2016). Temperature significantly affects the plaquing and adsorption efficiencies of *Listeria* phages. *Frontiers in Microbiology*, 7, 631. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00631>
- Tomat, D., Migliore, L., Aquili, V., Quiberoni, A., & Balagué, C. (2013). Phage biocontrol of enteropathogenic and shiga toxin-producing *Escherichia coli* in meat products. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 3, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2013.00020>
- Turner, D., Shkoporov, A. N., Lood, C., Millard, A. D., Dutilh, B. E., Alfenas-Zerbini, P., ... Adriaenssens, E. M. (2023). Abolishment of morphology-based taxa and change to binomial species names: 2022 taxonomy update of the ICTV bacterial viruses subcommittee. *Archives of Virology*, 168(2). <https://doi.org/10.1007/s00705-022-05694-2>
- Venhorst, J., van der Vossen, J. M. B. M., & Agamennone, V. (2022). Battling Enteropathogenic *Clostridia*: Phage Therapy for *Clostridioides difficile* and *Clostridium perfringens*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 891790. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.891790>
- Vikram, A., Woolston, J., & Sulakvelidze, A. (2021). Phage biocontrol applications in food production and processing. *Current Issues in Molecular Biology*, 40, 267-302. <https://doi.org/10.21775/cimb.040.267>

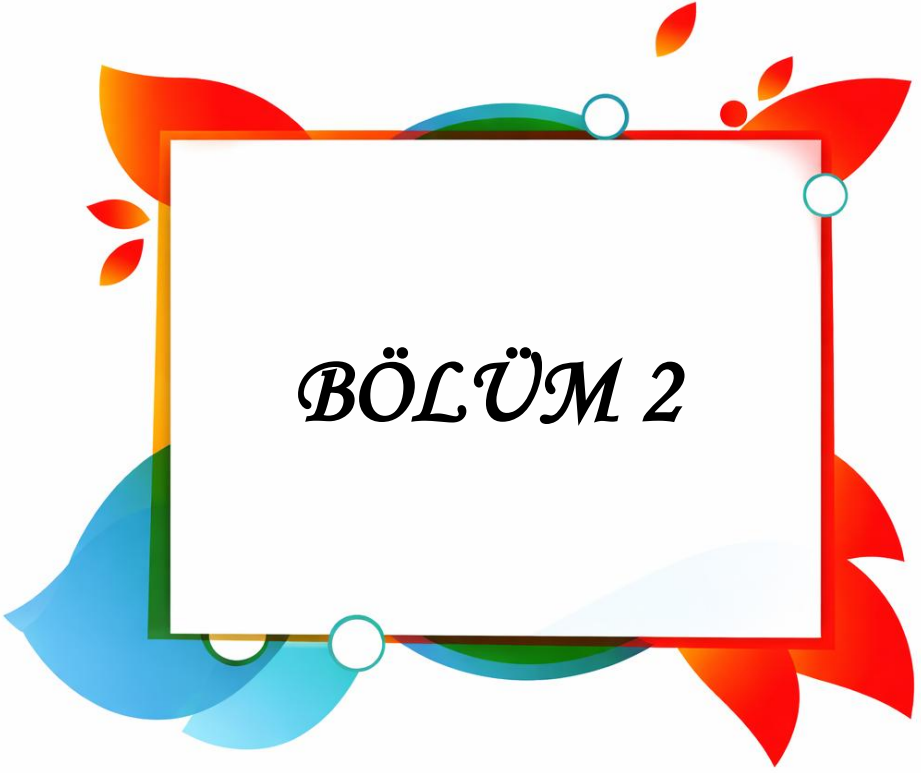
- Wagenaar, J. A., Bergen, M. A. P. V., Mueller, M. A., Wassenaar, T. M., & Carlton, R. M. (2005). Phage therapy reduces *Campylobacter jejuni* colonization in broilers. *Veterinary Microbiology*, 109, 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2005.06.002>
- Weng, S., López, A., Sáez-Orviz, S., Marcet, I., García, P., Rendueles, M., & Díaz, M. (2021). Effectiveness of bacteriophages incorporated in gelatine films against *Staphylococcus aureus*. *Food Control*, 121, 107666. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107666>
- Wessels, K., Rip, D., & Gouws, P. (2021). *Salmonella* in chicken meat: Consumption, outbreaks, characteristics, current control methods and the potential of bacteriophage use. *Foods*, 10, 1742. <https://doi.org/10.3390/foods10081742>
- World Health Organization. (2018a, Şubat 7). E. coli. Geliş tarihi 06 Şubat 2026, gönderen World Health Organization website: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/e-coli>
- World Health Organization. (2018b, Şubat 20). Listeriosis. Geliş tarihi 06 Şubat 2026, gönderen World Health Organization website: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/listeriosis>
- World Health Organization. (2018c, Şubat 20). *Salmonella* (non-typhoidal). Geliş tarihi 06 Şubat 2026, gönderen World Health Organization website: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-\(non-typhoidal\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-(non-typhoidal))
- World Health Organization. (2020, Mayıs 1). *Campylobacter*. Geliş tarihi 06 Şubat 2026, gönderen World Health Organization website: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/campylobacter>
- World Health Organization. (2023, Eylül 25). Botulism. Geliş tarihi 06 Şubat 2026, gönderen World Health Organization website: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/botulism>
- World Health Organization. (2024, Ekim 4). Food safety. Geliş tarihi 06 Şubat 2026, gönderen World Health Organization website: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>
- Xu, Y. (2021). Phage and phage lysins: New era of bio-preservatives and food safety agents. *Journal of Food Science*, 86, 3349-3373. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15843>
- Yan, J., Yang, R., Yu, S., & Zhao, W. (2021). The strategy of biopreservation of meat product against MRSA using lytic domain of lysin from *Staphylococcus aureus* bacteriophage. *Food Bioscience*, 41, 100967. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100967>
- Yao, X., Jia, C., Qin, T., Peng, D., Huang, L., Liu, Y., ... Wang, Y. (2025). Characterization of vB_SaRS_FS19-1, a newly isolated broad-host-range

and virulent bacteriophage infecting *Staphylococcus aureus* and its application in foods. *Food Chemistry*, 493, 146116. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146116>

Yeh, Y., Purushothaman, P., Gupta, N., Ragnone, M., Verma, S. C., & de Mello, A. S. (2017). Bacteriophage application on red meats and poultry: Effects on *Salmonella* population in final ground products. *Meat Science*, 127, 30-34. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.01.001>

Zhao, J., Lin, Y., Wang, C., Zayda, M., Maung, A. T., Mohammadi, T. N., ... Zeng, Z. (2023). Biocontrol of *Salmonella* Typhimurium in milk, lettuce, raw pork meat and ready-to-eat steamed-chicken breast by using a novel bacteriophage with broad host range. *International Journal of Food Microbiology*, 402, 110295. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110295>

Zulkarneev, E. R., Laishevtsev, A. I., Kiseleva, I. A., Efimova, O. G., & Aleshkin, A. V. (2025). Study of the Effectiveness of Bacteriophage BF1354 in the Decontamination of Chicken Meat Artificially Contaminated with an Antibiotic-Resistant Strain of *Salmonella*. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 178(6), 744-749. <https://doi.org/10.1007/s10517-025-06409-8>



BÖLÜM 2

Süt ve Fermente Süt Ürünlerinde Mikroplastikler: Süreç, Matriks ve Sağlık Etkileri Üzerine Bütüncül Bir Yaklaşım

Gencehan Karadağoglu¹

1. GİRİŞ

Küresel plastik üretiminin son yarım yüzyılda katlanarak artış göstermesi, plastik atıkların çevresel ortamlarda birikimini ve bu atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler sonucunda daha küçük partiküllere parçalanmasını kaçınılmaz hale getirmiştir (Geyer ve ark., 2017; Andrady, 2017). Bu parçalanma süreçlerinin sonucunda ortaya çıkan mikroplastikler (<5 mm) ve nanoplastikler (<1 µm), günümüzde yalnızca çevresel kirleticiler olarak değil, aynı zamanda biyolojik sistemlerle etkileşime girme potansiyeline sahip kompleks partikül sistemleri olarak değerlendirilmektedir (Galloway ve ark., 2017; Gigault ve ark., 2018).

Mikroplastiklerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve hidrofobik karakteri, bu partiküllerin çevresel kirleticileri adsorbe etme kapasitesini artırmaktadır. Bu durum, mikroplastiklerin biyoyararlanımı ve potansiyel toksikolojik etkileri açısından kritik bir rol oynamaktadır (Rochman ve ark., 2013; Hartmann ve ark., 2019). Bu özellikler, mikroplastiklerin yalnızca çevresel ortamlarda kalmayıp, biyolojik sistemlerle aktif etkileşime girebilen ve potansiyel sağlık etkileri oluşturabilen parçacıklar olarak değerlendirilmesine neden olmaktadır.

Başlangıçta mikroplastik araştırmaları ağırlıklı olarak deniz ekosistemler ve suda yaşayan organizmalar üzerinde yoğunlaşmış, özellikle trofik aktarım (besin zinciri yoluyla geçiş) yoluyla besin zincirine dahil olmaları incelenmiştir (Lusher ve ark., 2017; Provencher ve ark., 2019). Ancak son yıllarda elde edilen bulgular, mikroplastiklerin yalnızca sucul ortamlarda değil, aynı zamanda atmosferik taşınım, toprak sistemleri ve endüstriyel süreçler aracılığıyla çok daha geniş bir çevresel dağılıma sahip olduğunu ortaya koymuştur (Allen ve ark., 2019; Brahney ve ark., 2020). Dolayısıyla mikroplastiklerin gıda zincirine giriş yollarının sanılandan daha çeşitli ve karmaşık olduğu görülmektedir (Cox ve ark.,

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kafkas Üniversitesi, Kars Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Kars-Türkiye, ORCID: 0000-0003-3610-5894

2019; Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Nitekim içme suyu, tuz, bal, şeker ve çeşitli işlenmiş gıdalarda mikroplastik varlığının gösterilmesi, insan maruziyetinin yaygınlığını açıkça ortaya koymaktadır (Kosuth ve ark., 2018). Mikroplastik maruziyetinin değerlendirilmesinde yalnızca tekil çevresel ortamların değil, çoklu maruziyet yollarının birlikte ele alınması gerekmektedir.

Bu genel çerçeve içerisinde değerlendirildiğinde, gıda kaynaklı mikroplastik maruziyetine ilişkin mevcut literatürün büyük ölçüde deniz ürünleri ve içme suyu gibi belirli matrisler üzerine yoğunlaştığı, süt ve süt ürünlerinin ise görece sınırlı sayıda çalışmada ele alındığı dikkat çekmektedir (Toussaint ve ark., 2019; Senathirajah ve ark., 2021). Oysa süt üretim zinciri, çiftlikten son tüketiciye kadar uzanan çok basamaklı bir sistem olup, sağım ekipmanlarından depolama tanklarına, boru hatlarından proses makinelerine ve ambalaj materyallerine kadar çok sayıda temas yüzeyi içermektedir (Muncke, 2021; Groh ve ark., 2019). Bu temas yüzeylerinin önemli bir kısmının polimer esaslı materyallerden oluşması, mikroplastik oluşumu ve transferi açısından dikkate değer bir risk oluşturmaktadır (Hahladakis ve ark., 2018). Ayrıca üretim süreçlerinde uygulanan mekanik stres, sıcaklık değişimleri ve kimyasal temizlik işlemleri, bu materyallerde aşınmayı hızlandırarak sekonder mikroplastik oluşumuna katkıda bulunabilmektedir (Prata ve ark., 2020; Gewert ve ark., 2015). Bu nedenle süt üretim zinciri, mikroplastik kontaminasyonunun yalnızca çevresel değil, aynı zamanda proses kaynaklı dinamik bir süreç olarak değerlendirilmesi gereken en kritik gıda sistemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Süt ürünleri içerisinde özellikle fermente ürünler, mikroplastik davranışının değerlendirilmesi açısından özgün bir konumda yer almaktadır (Yong ve ark., 2020). Yoğurt, kefir, ayran ve çeşitli peynir türleri; laktik asit bakterileri ve/veya mayalar tarafından gerçekleştirilen fermentasyon süreçleri sonucunda oluşan, dinamik ve metabolik olarak aktif sistemlerdir (Marco ve ark., 2017). Bu sistemlerde pH düşüşü, protein ağ yapısının yeniden düzenlenmesi, ekzopolisakkarit üretimi ve mikrobiyal biyokütle artışı gibi çok sayıda biyokimyasal değişim meydana gelmektedir (Leroy ve De Vuyst, 2004). Bu değişimlerin mikroplastiklerin yüzey özellikleri, agregasyon davranışı, matris içerisindeki dağılımı ve potansiyel biyoyararlanımı üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir (Jin ve ark., 2019; Yong ve ark., 2020). Bu, fermente süt ürünlerindeki mikroplastik varlığının statik değil, proses koşullarına duyarlı aktif bir yapı sergileyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu etkileşimlere ilişkin sistematik ve deneysel verilerin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir (SAPEA, 2019).

Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri de halen önemli ölçüde belirsizliğini korumaktadır (EFSA, 2021). Mevcut toksikolojik çalışmalar büyük

ölçüde in vitro hücre kültürü deneyleri ve deneysel hayvan modellerine dayanmaktadır (Lu ve ark., 2018; Jin ve ark., 2019). Bu çalışmalar, mikroplastiklerin oksidatif stres indüksiyonu, inflamatuvar yanıtların tetiklenmesi, bağırsak epitel bütünlüğünün bozulması ve mikrobiyota kompozisyonunda değişiklikler gibi çeşitli biyolojik etkiler oluşturabileceğini göstermektedir (Jin ve ark., 2019; Yong ve ark., 2020). Bununla birlikte, bu bulguların insan sağlığına doğrudan ekstrapolasyonu sınırlıdır (EFSA, 2021). Özellikle kronik düşük doz maruziyetin uzun dönem etkileri ve nanoplastiklerin sistemik dağılımı gibi konuların henüz yeterince aydınlatılamadığı görülmektedir (Vethaak & Legler, 2021). Bu belirsizlikler, özellikle gıda kaynaklı kronik maruziyetin uzun vadeli etkilerinin değerlendirilmesini önemli ölçüde sınırlamaktadır.

Buna ek olarak, mikroplastiklerin yalnızca inert partiküller olmadığı; aynı zamanda ağır metaller, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), pestisitler ve plastik katkı maddeleri gibi potansiyel toksik bileşenleri taşıyabilen vektörler olarak da işlev görebileceği bilinmektedir (Rochman ve ark., 2013; Bakir ve ark., 2014). Bu durum, mikroplastik maruziyetinin toksikolojik değerlendirilmesini daha da karmaşık hale getirmekte ve tekil partikül etkilerinin ötesinde birleşik maruziyet senaryolarının dikkate alınmasını gerektirmektedir (Koelmans ve ark., 2016).

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, süt ve fermente gıdalar açısından mikroplastiklerin incelenmesi yalnızca kontaminasyon düzeylerinin belirlenmesi ile sınırlı kalmamalı; aynı zamanda kontaminasyon kaynaklarının ayrıştırılması, işleme süreçlerinin etkilerinin ortaya konması ve matriks-spesifik etkileşimlerin anlaşılmasını içeren çok boyutlu bir yaklaşım gerektirmektedir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Bu yaklaşım, mikroplastiklerin gıda sistemlerinde pasif kirleticilerden ziyade, üretim süreçleri ve matriks bileşenleri ile etkileşim halinde olan dinamik yapılar olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu bölümde, mikroplastiklerin süt ve fermente gıdalardaki kaynakları, işleme süreçleri ile ilişkili oluşum ve transfer mekanizmaları, analitik belirleme yaklaşımları, gıda matriksi ile etkileşimleri, insan maruziyet yolları ve potansiyel sağlık etkileri bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır. Böylece hem gıda güvenliği alanında çalışan araştırmacılar hem de düzenleyici kurumlar için bilimsel bir referans oluşturulması amaçlanmaktadır.

2. Mikroplastiklerin Tanımı, Sınıflandırılması ve Gıda Matrisindeki Davranışı

Mikroplastikler, genel olarak 5 mm'den küçük sentetik polimer partikülleri olarak tanımlanmakla birlikte, bu tanım literatürde tam anlamıyla standartlaşmış değildir (Hartmann ve ark., 2019; Frias ve Nash, 2019). Özellikle alt boyut sınırları ve sınıflandırma kriterleri, kullanılan analitik yöntemlere ve araştırma amacına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. (Koelmans ve ark., 2019; Cowger ve ark., 2020). Nanoplastikler ise genellikle 1 µm'nin altındaki partikülleri ifade etmekte olup, bazı çalışmalarda bu sınırın 100 nm'ye kadar indirildiği görülmektedir (Gigault ve ark., 2018; EFSA, 2021). Bu terminolojik belirsizlik, farklı çalışmaların karşılaştırılmasını sınırlayan önemli bir metodolojik sorun olarak değerlendirilebilir (Hartmann ve ark., 2019). Bu bağlamda, mikroplastiklerin gıda sistemlerindeki davranışının standardize edilmiş yaklaşımlarla değerlendirilmesine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır.

2.1. Mikroplastiklerin Kaynak ve Oluşum Mekanizmalarına Göre Sınıflandırılması

Mikroplastikler, oluşum mekanizmalarına göre primer ve sekonder olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Andrady, 2017; Cole ve ark., 2011). Primer mikroplastikler, üretim aşamasında doğrudan küçük boyutlarda üretilen partiküller olup, kozmetik ürünler, temizlik ajanları ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan mikrobuncuklar bu gruba örnek teşkil etmektedir (Fendall ve Sewell, 2009; UNEP, 2016). Sekonder mikroplastikler ise daha büyük plastik materyallerin fiziksel (UV ışınımı, mekanik aşınma), kimyasal (oksidasyon) ve biyolojik (mikrobiyal degradasyon) süreçler sonucunda parçalanmasıyla oluşmaktadır (Andrady, 2017; Gewert ve ark., 2015; Hahladakis ve ark., 2018). Gıda sistemlerinde gözlenen mikroplastiklerin büyük ölçüde sekonder kaynaklı olduğunu ve kontaminasyonun üretim ve işleme süreçleriyle doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir.

Gıda sistemleri özelinde değerlendirildiğinde, sekonder mikroplastiklerin daha baskın olduğu görülmektedir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Luo ve ark., 2022). Özellikle gıda ile temas eden materyallerin zamanla aşınması, proses ekipmanlarının mekanik yük altında deformasyonu ve ambalaj materyallerinin yaşlanması, mikroplastik oluşumunun başlıca kaynaklarını oluşturmaktadır (Muncke, 2021; Groh ve ark., 2019; Sobhani ve ark., 2020).

2.2. Polimer Türüne Göre Mikroplastiklerin Sınıflandırılması ve Özellikleri

Mikroplastiklerin kimyasal yapısı, biyolojik etkileşimlerini ve çevresel davranışlarını belirleyen en kritik faktörlerden biridir (Rochman ve ark., 2013;

Hartmann ve ark., 2019). Gıda sistemlerinde en sık tespit edilen polimer türleri arasında polietilen (PE), polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET), polistiren (PS), poliamid (PA) ve poliüretan (PU) yer almaktadır (Käppler ve ark., 2016; Primpke ve ark., 2018; Mintenig ve ark., 2017). Bu polimerlerin her biri farklı fizikokimyasal özelliklere sahiptir (Gigault ve ark., 2018). Örneğin PE ve PP gibi düşük yoğunluklu polimerler hidrofobik özellikleri nedeniyle lipid fazı ile daha güçlü etkileşim gösterebilirken, PET gibi daha polar polimerler proteinlerle farklı türde bağlanma davranışları sergileyebilmektedir (Rochman ve ark., 2013; Guo ve Wang, 2019). Bu farklılıklar, mikroplastiklerin gıda matrisi içerisindeki dağılımını, stabilitesini ve biyoyararlanımını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Ayrıca, polimerlere eklenen katkı maddelerinin zamanla matristen ayrılması, mikroplastiklerin toksikolojik etkilerini daha karmaşık hale getirebilmektedir (Hermabessiere ve ark., 2017; Hahladakis ve ark., 2018; Groh ve ark., 2019).

2.3. Boyut, Şekil ve Yüzey Özelliklerinin Mikroplastik Davranışındaki Rolü

Mikroplastiklerin biyolojik sistemlerle etkileşiminde yalnızca kimyasal yapı değil, aynı zamanda partikül boyutu, şekli ve yüzey özellikleri de belirleyici rol oynamaktadır (Wright ve Kelly, 2017; Hartmann ve ark., 2019). Boyut küçüldükçe yüzey alanı/hacim oranının artması, partikülün reaktifliğini ve çevresel kirleticileri adsorbe etme kapasitesini artırmaktadır. Bu nedenle partikül boyutu ve şekli, yalnızca çevresel davranışı değil, aynı zamanda sindirim sistemi içerisindeki etkileşimleri ve potansiyel toksikolojik etkileri de doğrudan belirlemektedir. (Rochman ve ark., 2013; Gigault ve ark., 2018).

Boyut özelliklerine ek olarak, mikroplastiklerin şekli de çevresel ve biyolojik davranışları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Şekil açısından mikroplastikler lif, fragment (parça), film ve granül formunda bulunabilmektedir (Frias ve Nash, 2019; Visentin, E., ve ark., 2024). Lif formundaki mikroplastikler özellikle hava kaynaklı kontaminasyonda baskın olup, gıda örneklerinde sıklıkla tespit edilmektedir (Dris ve ark., 2016; Allen ve ark., 2019). Buna karşılık fragment formundaki partiküller çoğunlukla ambalaj ve ekipman kaynaklıdır (Käppler ve ark., 2016; Sobhani ve ark., 2020).

Yüzey pürüzlülüğü, oksidatif yaşlanma ve biyofilm oluşumu gibi faktörler, mikroplastiklerin biyolojik ortamlarla etkileşimini önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Gewert ve ark., 2015; Rummel ve ark., 2017). Çevresel ortamlarda uzun süre kalan mikroplastiklerin yüzeyinde mikroorganizmaların kolonize olabildiği ve “plastisphere” olarak adlandırılan biyolojik yapıların oluşabildiği bilinmektedir (Zettler ve ark., 2013; Amaral-Zettler ve ark., 2020).

Bu yapıların gıda sistemlerine taşınması, hem mikrobiyal yük hem de patojen transferi açısından potansiyel risk oluşturmaktadır (Keswani ve ark., 2016).

2.4. Gıda Matrisinde Mikroplastik Davranışı

Gıda sistemlerinde mikroplastiklerin davranışı yalnızca partikül özelliklerine değil, aynı zamanda gıda matrisinin bileşimine de bağlıdır (Guo ve Wang, 2019; Koelmans ve ark., 2019). Bu etkileşimler, mikroplastiklerin gıda sistemlerinde yalnızca pasif kirleticiler değil, aynı zamanda matris bileşenleri ile sürekli etkileşim halinde olan dinamik yapılar olarak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır (McClements, 2015; McClements ve Xiao, 2017).

2.4.1. Protein–Mikroplastik Etkileşimleri

Süt proteinleri, özellikle kazein miselleri ve serum proteinleri, mikroplastik yüzeylerine adsorbe olabilmektedir (Cedervall ve ark., 2007; Monopoli ve ark., 2012). Bu durum, partiküllerin yüzey yükünü, hidrofobitesini ve agregasyon davranışını değiştirebilmektedir (Tenzer ve ark., 2013). Bu etkileşimler, mikroplastiklerin hücre alımı ve biyoyararlanımı üzerinde belirleyici bir etki oluşturabileceğinden, gıda kaynaklı maruziyetin değerlendirilmesinde kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Protein kaplanması (protein corona oluşumu), mikroplastiklerin biyolojik ortamlardaki davranışını belirleyen kritik bir faktör olup, partikülün hücre alımını doğrudan etkileyebilmektedir (Monopoli ve ark., 2012; Walkey ve Chan, 2012).

2.4.2. Lipid Fazı ile Etkileşim

Süt ve süt ürünlerinde bulunan yağ globülleri, hidrofobik mikroplastiklerle etkileşime girerek partiküllerin matris içinde tutulmasına veya yeniden dağılımına neden olabilmektedir (Guo ve Wang, 2019). Bu durum özellikle tam yağlı ürünlerde mikroplastiklerin homojen olmayan dağılım göstermesine yol açabilmektedir (McClements, 2015). Bu heterojen dağılım, mikroplastiklerin analizinde örnekleme ve ölçüm sonuçlarının değişkenlik göstermesine neden olabilmektedir.

2.4.3. Fermentasyon Sürecinin Etkileri

Fermentasyon süreci, mikroplastik davranışı açısından literatürde en az incelenmiş alanlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Yong ve ark., 2020). Fermentasyon sırasında meydana gelen pH düşüşü, iyonik güç değişimi ve mikrobiyal metabolitlerin birikimi, mikroplastiklerin agregasyonunu ve yüzey özelliklerini değiştirebilmektedir (Jin ve ark., 2019; Guo ve Wang, 2019). Ayrıca laktik asit bakterileri tarafından üretilen ekzopolisakkaritler, partiküllerin matris içinde tutulmasını etkileyebilmektedir (Zhai ve ark., 2021; Lynch ve ark., 2018).

Bu durum, fermente süt ürünlerinin mikroplastik davranışının incelenmesi açısından model sistemler olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.

Mikroplastiklerin mikrobiyal hücre yüzeylerine bağlanma potansiyeli, bu partiküllerin probiyotik bakterilerle etkileşime girebileceğini düşündürmektedir (Rummel ve ark., 2017). Ancak bu etkileşimlerin probiyotik canlılık, adezyon kapasitesi ve metabolik aktivite üzerindeki etkileri henüz net olarak ortaya konmamıştır (SAPEA, 2019).

2.4.4. pH ve İyonik Gücün Etkisi

Gıda matriksindeki pH ve iyonik gücü, mikroplastiklerin yüzey yükünü ve agregasyon eğilimini doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir (Koelmans ve ark., 2019). Özellikle fermente ürünlerde düşük pH koşulları, partiküllerin yüzey özelliklerini değiştirerek farklı etkileşim mekanizmalarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Jin ve ark., 2019). Bu nedenle pH ve iyonik gücü değişimleri, özellikle fermente ürünlerde mikroplastik davranışının öngörülmesinde kritik parametreler olarak değerlendirilmektedir.

2.5. Mikroplastiklerin Taşıyıcı (Vektör) Rolü

Mikroplastikler yalnızca inert partiküller olarak değil, aynı zamanda çevresel kirleticiler için taşıyıcı platformlar olarak da değerlendirilmektedir (Rochman ve ark., 2013; Bakir ve ark., 2014). Hidrofobik yüzey yapıları nedeniyle ağır metaller, pestisitler, poliaromatik hidrokarbonlar ve diğer organik kirleticiler mikroplastik yüzeyine adsorbe olabilmektedir (Bakir ve ark., 2014; Teuten ve ark., 2009).

Gıda sistemlerinde bu durum, mikroplastiklerin “oklu maruziyet” (co-exposure) senaryolarına katkıda bulunabileceğini göstermektedir (Koelmans ve ark., 2016). Özellikle süt gibi yağ ve protein açısından zengin matrislerde, bu kirleticilerin biyoyararlanımının artabileceği düşünülmektedir (Guo ve Wang, 2019). Bu nedenle mikroplastikler, yalnızca partikül bazlı değil, aynı zamanda çoklu kimyasal maruziyeti artıran kompleks risk faktörleri olarak değerlendirilmelidir (Rochman ve ark., 2013; Koelmans ve ark., 2016).

2.6. Nanoplastiklerin zellikleri ve nemi

Nanoplastikler, boyutlarının kklğu nedeniyle biyolojik bariyerleri açma potansiyeline sahip olup, hücresel düzeyde etkileşim gösterebilmektedir (Gigault ve ark., 2018; Vethaak ve Legler, 2021). Endositoz yoluyla hücre içine alınabilmeleri ve dolaşım sistemine katılabilmeleri, bu partiküllerin sistemik dağılımını mümkün kılmaktadır (Mattsson ve ark., 2017; Lu ve ark., 2018). Bu nedenle nanoplastikler, hem toksikolojik hem de analitik belirsizliklerin en önemli kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte nanoplastiklerin analitik olarak tespiti son derece zordur ve mevcut yöntemler bu partiküllerin büyük bir kısmını belirleyememektedir (Koelmans ve ark., 2019; Cowger ve ark., 2020; Schwaferts ve ark., 2019). Bu durum, mevcut mikroplastik çalışmalarının gerçek maruziyet düzeylerini olduğundan düşük tahmin etme olasılığını artırmaktadır (SAPEA, 2019). Dolayısıyla nanoplastikler, hem toksikolojik hem de analitik açıdan mikroplastik araştırmalarının en kritik bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (EFSA, 2021; Koelmans ve ark., 2022).

3. Süt ve Fermente Gıdalarda Mikroplastik Kaynakları

Süt ve fermente gıdalarda mikroplastik kontaminasyonu, tekil bir kaynağa indirgenemeyecek ölçüde çok faktörlü ve süreç bağımlı bir olgu olarak değerlendirilmektedir (Kutram-Muniasamy ve ark., 2020; Wright ve Kelly, 2017). Mevcut literatür, bu kontaminasyonun üretim zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkabildiğini ve çoğu zaman birden fazla kaynağın eş zamanlı katkısı ile şekillendiğini göstermektedir (Prata ve ark., 2020; Muncke, 2021). Bu nedenle mikroplastik varlığının değerlendirilmesi, yalnızca son ürün analizine dayanmamalı; çiftlikten son tüketiciye kadar uzanan tüm süreçlerin bütüncül olarak incelenmesini gerektirmektedir (Groh ve ark., 2019; Koelmans ve ark., 2019).

3.1. Çiftlik ve Hammadde Düzeyinde Mikroplastik Kontaminasyonu

Süt üretiminin ilk aşaması olan çiftlik düzeyi, mikroplastik maruziyetinin başlangıç noktası olarak ele alınabilir (Kutram-Muniasamy ve ark., 2020; Wright ve Kelly, 2017). Hayvanların tükettiği yemler, içme suyu ve çevresel koşullar, ham sütte mikroplastik varlığı açısından potansiyel kaynaklar oluşturmaktadır (Cox ve ark., 2019; Prata ve ark., 2020). Özellikle plastik ambalajlı yemlerin kullanımı, silaj örtüleri, sentetik lif içeren tarımsal ekipmanlar ve çevresel toz, mikroplastiklerin hayvanlara dolaylı olarak aktarılmasına neden olabilmektedir (Allen ve ark., 2019; Dris ve ark., 2016).

Bununla birlikte mevcut literatürde, mikroplastiklerin hayvansal organizma içerisindeki biyotransferi ve süte geçiş mekanizmaları sınırlı düzeyde incelenmiştir (EFSA, 2021). Bazı deneysel çalışmalar, mikroplastiklerin gastrointestinal sistemden dolaşıma geçebileceğini ve belirli dokularda birikebileceğini göstermektedir; ancak bu partiküllerin süt bezine geçişi ve süte sekresyonu konusundaki veriler henüz yetersizdir (Lu ve ark., 2018; Deng ve ark., 2017; Yong ve ark., 2020). Bu durum, çiftlik düzeyinde mikroplastik kontaminasyonunun dolaylı ancak göz ardı edilemeyecek bir katkı sağlayabileceğini göstermektedir (SAPEA, 2019).

3.2. Sağım ve İlk İşleme Aşamalarında Kontaminasyon

Sağım işlemi sırasında kullanılan ekipmanlar (sağım makineleri, hortumlar, bağlantı elemanları ve conta sistemleri), genellikle polimer esaslı materyaller içermektedir (Muncke, 2021; Groh ve ark., 2019). Bu ekipmanların sürekli mekanik stres altında çalışması, zamanla mikro düzeyde aşınmaya ve partikül kopmasına neden olabilmektedir (Prata ve ark., 2020). Özellikle eski veya bakım görmemiş sistemlerde bu riskin daha yüksek olduğu düşünülmektedir (Wright ve Kelly, 2017).

Sağım sonrası süt, genellikle soğutma tanklarına aktarılmakta ve burada belirli bir süre depolanmaktadır (Muncke, 2021). Bu tankların iç yüzey kaplamaları ve karıştırıcı sistemleri de mikroplastik oluşumu açısından potansiyel risk taşımaktadır (Groh ve ark., 2019). Ayrıca süt transferi sırasında kullanılan boru hatları ve pompalar, akışkan dinamiği ve sürtünme etkisiyle polimer yüzeylerde aşınmayı artırabilmektedir (Prata ve ark., 2020). Bu nedenle sağım sistemlerinin tasarımı ve bakım durumu, mikroplastik kontaminasyonunun kontrolünde kritik bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

3.3. Endüstriyel İşleme Süreçlerinde Mikroplastik Oluşumu

Endüstriyel süt işleme tesisleri, mikroplastik kontaminasyonu açısından en kritik aşamalardan birini oluşturmaktadır (Muncke, 2021; Groh ve ark., 2019). Pastörizatörler, sterilizatörler, homojenizatörler, separatörler, filtre sistemleri ve karıştırıcılar gibi ekipmanlar, yüksek sıcaklık, basınç ve mekanik stres altında çalışmaktadır (Prata ve ark., 2020). Bu koşullar, polimer bileşenlerde mikroyapısal deformasyon ve parçalanmayı hızlandırabilmektedir (Gewert ve ark., 2015).

Özellikle homojenizasyon işlemi sırasında uygulanan yüksek basınç, yalnızca süt yağ globüllerini değil, aynı zamanda mevcut mikroplastik partikülleri de daha küçük boyutlara parçalayabilmektedir (McClements, 2015; Gigault ve ark., 2018). Bu durum, partikül sayısının artmasına ve daha küçük boyutlu, dolayısıyla biyoyararlanımı daha yüksek partiküllerin oluşmasına yol açabilmektedir (Gigault ve ark., 2018).

Ayrıca proses ekipmanlarının temizliğinde kullanılan kimyasal ajanlar (alkali ve asidik deterjanlar), polimer yüzeylerin kimyasal stabilitesini zamanla azaltarak aşınma hızını artırabilmektedir (Muncke, 2021). Bu durum, özellikle uzun süre kullanılan ekipmanlarda sekonder mikroplastik oluşumunun önemli bir kaynağı haline gelebilmektedir (Prata ve ark., 2020). Endüstriyel işleme süreçlerinin yalnızca kontaminasyon kaynağı değil, aynı zamanda mikroplastiklerin boyut dağılımını ve potansiyel biyoyararlanımını belirleyen önemli ve aktif bir faktör olduğu söylenebilir.

3.4. Proses Suyu ve Yardımcı Sistemlerin Rolü

Süt işleme süreçlerinde kullanılan su, doğrudan veya dolaylı olarak ürünle temas edebilmektedir (Cox ve ark., 2019). Eğer proses suyu yeterli filtrasyon ve arıtma aşamalarından geçirilmemişse, mikroplastiklerin sisteme taşınmasına neden olabilir (Kosuth ve ark., 2018; Pivokonsky ve ark., 2018). Özellikle geri dönüşümlü su sistemlerinin kullanıldığı tesislerde bu risk daha belirgin hale gelebilir (Prata ve ark., 2020).

Buna ek olarak, buhar üretim sistemleri, soğutma sistemleri ve CIP (clean-in-place) döngüleri de dolaylı kontaminasyon kaynakları olarak değerlendirilebilir (Muncke, 2021). CIP sistemlerinde kullanılan yüksek sıcaklık ve kimyasallar, ekipman yüzeylerinde mikroyapısal değişimlere yol açarak mikroplastik oluşumunu tetikleyebilmektedir (Prata ve ark., 2020). Bu nedenle proses suyu kalitesi, mikroplastik kontaminasyonunun kontrolünde göz ardı edilmemesi gereken bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

3.5. Hava Kaynaklı Mikroplastik Kontaminasyonu

Hava kaynaklı mikroplastikler, özellikle lif formundaki partiküller, gıda üretim ortamlarında önemli bir kontaminasyon kaynağıdır (Dris ve ark., 2016; Allen ve ark., 2019). Tekstil ürünlerinden (çalışan kıyafetleri), filtre sistemlerinden ve genel ortam havasından kaynaklanan bu partiküller, açık sistemlerde ürün yüzeyine kolaylıkla ulaşabilmektedir (Prata ve ark., 2020).

Laboratuvar ortamlarında yapılan mikroplastik analizlerinde blank kontrollerin zorunlu hale gelmesi, hava kaynaklı kontaminasyonun ne denli kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Hermsen ve ark., 2018). Bu nedenle endüstriyel üretim ortamlarında da hava filtrasyonu ve kapalı sistem kullanımı, mikroplastik kontaminasyonunun kontrolü açısından önem taşımaktadır (Prata ve ark., 2020). Dolayısıyla hava kontrol sistemlerinin gıda güvenliği açısından yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.

3.6. Fermentasyon Sürecinde Mikroplastik Davranışı

Fermentasyon aşaması, süt ürünlerini diğer gıda gruplarından ayıran en özgün süreçlerden biridir (Marco ve ark., 2017). Bu aşamada doğrudan mikroplastik oluşumu söz konusu olmasa da, mevcut partiküllerin davranışı önemli ölçüde değişebilmektedir (Yong ve ark., 2020). pH düşüşü, iyonik ortamın değişmesi ve mikrobiyal metabolitlerin birikimi, mikroplastiklerin agregasyonunu ve matriks içerisindeki dağılımını etkileyebilmektedir (Jin ve ark., 2019).

Ayrıca mikroplastiklerin mikrobiyal hücre yüzeylerine bağlanabilme potansiyeli, bu partiküllerin fermentasyon mikrobiyotası ile etkileşime girebileceğini düşündürmektedir (Rummel ve ark., 2017). Ancak bu

etkileşimlerin probiyotik bakterilerin canlılığı, adezyon kapasitesi ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkileri henüz yeterince araştırılmamıştır (SAPEA, 2019). Bu yüzden fermente süt ürünleri mikroplastik-mikrobiyota etkileşimlerinin incelenmesi açısından özgün model sistemler olarak değerlendirilebilir.

3.7. Ambalaj ve Depolama Kaynaklı Mikroplastik Kontaminasyonu

Ambalaj materyalleri, süt ve fermente gıdalarda mikroplastik kontaminasyonunun en önemli kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Muncke, 2021; Groh ve ark., 2019). Plastik şişeler, çok katmanlı ambalajlar, kapak sistemleri ve iç yüzey kaplamaları, depolama süresi boyunca mikroplastik salınımına neden olabilmektedir (Hermabessiere ve ark., 2017; Muncke, 2021).

Sıcaklık değişimleri, UV ışınımı, mekanik stres ve ürünün kimyasal bileşimi (özellikle asidik yapı), ambalaj materyallerinin stabilitesini etkileyerek mikroplastik oluşumunu hızlandırabilmektedir (Gewert ve ark., 2015). Fermente ürünlerde düşük pH koşulları, ambalaj materyalleri ile etkileşimi artırarak migrasyon riskini yükseltebilmektedir (Muncke, 2021). Bu durum, ambalaj materyallerinin seçimi ve raf ömrü koşullarının mikroplastik maruziyetinin belirlenmesinde kritik rol oynadığını göstermektedir.

Depolama süresinin uzaması da mikroplastik kontaminasyonunu artırabilecek önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Prata ve ark., 2020). Bu nedenle raf ömrü boyunca mikroplastik migrasyonunun değerlendirilmesi, gıda güvenliği açısından kritik bir araştırma alanıdır.

3.8. Süreç Bağımlı Mikroplastik Kontaminasyonunun Bütüncül Değerlendirilmesi

Süt ve fermente gıdalarda mikroplastik kontaminasyonu, lineer bir süreçten ziyade kümülatif ve çok boyutlu bir yapı göstermektedir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Çiftlikten başlayan kontaminasyon, işleme ve ambalaj aşamalarında artarak devam edebilmektedir (Prata ve ark., 2020). Bu nedenle son üründe tespit edilen mikroplastiklerin kaynağını tek bir aşamaya atfetmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır (Koelmans ve ark., 2019).

Bu durum, mikroplastik araştırmalarında “kaynak ayrıştırma” (source apportionment) çalışmalarının önemini artırmaktadır (Koelmans ve ark., 2019). Bu çerçevede, mikroplastik kontaminasyonunun değerlendirilmesinde süreç temelli ve entegre yaklaşımlar, gelecekteki araştırmaların temelini oluşturmalıdır.

4. İşleme Süreçlerinin Mikroplastik Davranışına Etkisi

Süt ve fermente gıdaların üretiminde uygulanan teknolojik işlemler, yalnızca ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini değil, aynı zamanda mikroplastiklerin oluşumunu, parçalanmasını, yeniden dağılımını ve matriks içindeki davranışını

da önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Prata ve ark., 2020; Koelmans ve ark., 2019). Bu bağlamda mikroplastikler, üretim sürecinde pasif olarak taşınan partiküller olmaktan ziyade, dinamik olarak değişime uğrayan ve proses koşullarına duyarlı sistemler olarak değerlendirilmelidir (Wright ve Kelly, 2017).

4.1. Mekanik İşlemler ve Mikroplastik Parçalanma Dinamikleri

Süt işleme süreçlerinde uygulanan mekanik işlemler (pompalama, karıştırma, homojenizasyon), yüksek kesme kuvvetleri ve türbülanslı akış koşulları oluşturarak polimer yüzeylerde mikroyapısal deformasyona neden olabilmektedir (Gewert ve ark., 2015; Prata ve ark., 2020). Bu deformasyonlar, özellikle sekonder mikroplastik oluşumunun temel mekanizmalarından biri olan mekanik parçalanmayı tetikleyebilmektedir (Andrady, 2017).

Homojenizasyon işlemi bu açıdan özel bir öneme sahiptir. 100–300 bar aralığında uygulanan, yüksek basınç altında süt yağ globülleri parçalanırken, aynı ortamda bulunan mikroplastik partiküller de benzer kesme kuvvetlerine maruz kalmaktadır (McClements, 2015). Bu durum, partikül boyutunun küçülmesine ve partikül sayısının artmasına neden olabilmektedir (Gigault ve ark., 2018). Boyut küçülmesi ile birlikte yüzey alanının artması, partiküllerin kimyasal etkileşim kapasitesini ve biyoyararlanım potansiyelini artırabilmektedir (Rochman ve ark., 2013).

4.2. Isıl İşlemler ve Polimer Stabilitesi

Pastörizasyon ve sterilizasyon gibi ısı işlemler, doğrudan mikroplastik üretimine yol açmasa da, polimer materyallerin fiziksel ve kimyasal stabilitesi üzerinde önemli etkiler oluşturabilmektedir (Muncke, 2021). Yüksek sıcaklıklar, polimer zincirlerinde termal oksidasyon süreçlerini hızlandırarak materyalin kırılganlığını artırabilmektedir (Gewert ve ark., 2015). Bu durum, sonraki mekanik stresler altında parçalanmayı kolaylaştırmaktadır (Andrady, 2017).

Ayrıca ısı işlemler sırasında ambalaj veya ekipman yüzeylerinden migrasyon yoluyla mikroplastik veya plastik katkı maddelerinin gıdaya geçişi söz konusu olabilmektedir (Groh ve ark., 2019; Hermabessiere ve ark., 2017; Muncke, 2021). Özellikle tekrarlanan ısıtma-soğutma döngüleri, polimer yüzeylerinde mikro çatlakların oluşmasına ve bu çatlaklardan partikül kopmasına neden olabilmektedir (Muncke, 2021). Isıl işlemler, mikroplastik oluşumunu dolaylı olarak etkileyen ve polimer stabilitesini belirleyen kritik süreçler arasında yer almaktadır.

4.3. Kimyasal Etkiler ve Yüzey Degradasyonu

Süt işleme tesislerinde kullanılan temizlik ve sanitasyon ajanları (alkali ve asidik deterjanlar, oksitleyici bileşikler), polimer yüzeylerde kimyasal

degradasyona yol açabilmektedir (Prata ve ark., 2020). Bu degradasyon, polimer zincirlerinin kırılması, yüzey pürüzlülüğünün artması ve mekanik dayanımın azalması ile sonuçlanmaktadır (Gewert ve ark., 2015).

CIP (clean-in-place) sistemlerinde kullanılan yüksek sıcaklık ve kimyasal kombinasyonları, uzun vadede ekipman yüzeylerinde mikroyapısal zayıflamaya neden olarak mikropplastik oluşumunu hızlandırabilmektedir (Muncke, 2021). Bu etki, özellikle polimer bazlı conta ve hortum sistemlerinde daha belirgin olabilmektedir (Groh ve ark., 2019).

4.4. Fermentasyon Sürecinin Mikropplastik Davranışı Üzerindeki Etkisi

Fermentasyon, mikropplastik davranışı açısından en kompleks ve aynı zamanda en az çalışılmış süreçlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Yong ve ark., 2020; SAPEA, 2019). Bu süreçte meydana gelen çok sayıda biyokimyasal değişim, mikropplastiklerin fizikokimyasal özelliklerini dolaylı olarak etkileyebilmektedir (Jin ve ark., 2019).

4.4.1. pH Değişimi ve Yüzey Özellikleri

Fermentasyon sırasında pH'nın düşmesi, mikropplastiklerin yüzey yükünü ve zeta potansiyelini değiştirebilmektedir (Koelmans ve ark., 2019). Bu değişim, partiküllerin agregasyon eğilimini doğrudan etkilemektedir (Jin ve ark., 2019). Düşük pH koşullarında partiküller arasında çekim kuvvetleri artabilir ve daha büyük agregatlar oluşabilmektedir (Guo ve Wang, 2019).

4.4.2. Ekzopolisakkarit (EPS) Etkisi

Laktik asit bakterileri tarafından üretilen ekzopolisakkaritler, mikropplastiklerin matris içinde tutulmasını etkileyebilmektedir (Patel ve ark., 2012; Zhai ve ark., 2021). EPS yapıları, partikülleri fiziksel olarak kapsayarak onların serbest hareketini sınırlayabilir veya belirli bölgelerde birikmesine neden olabilmektedir (Yong ve ark., 2020).

4.4.3. Mikrobiyal-Partikül Etkileşimleri

Mikropplastiklerin mikrobiyal hücre yüzeylerine adsorbe olabilmesi, bu partiküllerin “taşıyıcı yüzey” olarak davranmasına neden olabilmektedir (Rummel ve ark., 2017). Bu durum, mikroorganizmaların yüzey adezyonunu, biyofilm oluşumunu ve hatta metabolik aktivitesini etkileyebilmektedir (Zettler ve ark., 2013; Amaral-Zettler ve ark., 2020). Bununla birlikte bu etkileşimlerin yönü ve büyüklüğü henüz net olarak ortaya konmamıştır (SAPEA, 2019).

4.5. Faz Ayrımı ve Mikropplastik Dağılım Dinamikleri

Süt ve fermente gıdalar heterojen sistemler olup, su, yağ ve protein ağı gibi farklı fazları içermektedir. (McClements, 2015) Mikropplastiklerin bu fazlar

arasındaki dağılımı, partikül özelliklerine ve proses koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. (Guo ve Wang, 2019; Koelmans ve ark., 2019)

Hidrofobik polimerler yağ fazına daha fazla eğilim gösterirken, daha polar yüzeylere sahip partiküller protein matriksine bağlanabilmektedir (Rochman ve ark., 2013; Guo ve Wang, 2019) Bu durum, ürün içerisindeki mikroplastik dağılımının homojen olmamasına ve analiz sonuçlarının örnekleme yöntemine duyarlı hale gelmesine neden olabilmektedir (Koelmans ve ark., 2019).

4.6. Depolama Süreci ve Zaman Bağımlı Değişimler

Depolama süresi boyunca mikroplastik davranışı statik değildir (Hahladakis ve ark., 2018; Luo ve ark., 2022). Ambalaj materyalleri ile temas süresinin artması, sıcaklık değişimleri ve ışık maruziyeti, mikroplastik oluşumunu ve migrasyonunu artırmaktadır (Sobhani ve ark., 2020; Dong ve ark., 2023).

Fermente ürünlerde depolama süresi boyunca devam eden biyokimyasal değişimler (post-asidifikasyon, protein ağ yapısındaki değişimler), mikroplastiklerin matriks içindeki konumunu ve etkileşimlerini değiştirebilmektedir (McClements, 2015; Zhai ve ark., 2021). Bu nedenle raf ömrü boyunca mikroplastik davranışının zamana ve depolama koşullarına bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Luo ve ark., 2022)

4.7. Süreç Temelli Mikroplastik Davranışının Bütüncül Değerlendirilmesi

Süt ve fermente gıdalarda mikroplastik davranışı, tek bir işlem basamağı ile açıklanamayacak kadar karmaşıktır (Koelmans ve ark., 2022; Guo ve ark., 2020). Mekanik, termal, kimyasal ve biyolojik süreçler birbirleriyle etkileşim halinde çalışarak partikül oluşumu ve dönüşümünü belirlemektedir (Zhang ve ark., 2021; Luo ve ark., 2022).

Bu bağlamda mikroplastiklerin değerlendirilmesi, statik bir “kontaminasyon seviyesi” yaklaşımından ziyade, dinamik ve süreç odaklı bir perspektif gerektirmektedir (Koelmans ve ark., 2022). Bu yaklaşım, hem mikroplastik oluşum mekanizmalarının anlaşılması hem de kontaminasyonun kontrolüne yönelik stratejilerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Hahladakis ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2021).

Bu çerçevede, süt işleme teknolojilerinin mikroplastik oluşumu ve dönüşümü üzerindeki etkileri yalnızca kontaminasyon kaynağı olarak değil, aynı zamanda partikül davranışını belirleyen aktif süreçler olarak değerlendirilmelidir. Süt ve fermente süt ürünlerinde mikroplastiklerin süreç temelli kaynakları, oluşum mekanizmaları ve matriks içi etkileşimleri literatür destekli olarak Tablo 1’de özetlenmiştir. Tablo 1, mikroplastiklerin üretim zinciri boyunca nasıl dönüşüme

uğradığını ve farklı proses aşamalarında nasıl davrandığını sistematik olarak ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Süt ve fermente süt ürünlerinde mikroplastiklerin kaynakları, oluşum mekanizmaları ve matriks içi davranışları

Kaynak / Aşama	Mekanizma	Mikroplastik Türü	Matriks Etkileşimi	Sistem Üzerindeki Etki	Referans
Çiftlik (yem, su, çevre)	Çevresel maruziyet	Lif, fragment	Düşük	Ham süt kontaminasyonunu	Allen ve ark., 2019; Brahney ve ark., 2020
Sağım ekipmanları	Mekanik aşınma	Fragment	Düşük–orta	Sağım sırasında ilk kontaminasyon	Andrady, 2017
Proses (pompalama, karıştırma)	Kesme kuvveti, türbülans	Fragment	Orta	Partikül parçalanması	Gewert ve ark., 2015
Homojenizasyon	Yüksek basınç ve kesme kuvveti	Küçük partiküller, mikro/nano	Yüksek	Yüzey alanı ve reaktivite artışı	Guo & Wang, 2019
Isıl işlemler	Termal oksidasyon, materyal yorgunluğu	Mikro/nano fragment	Orta	Polimer kırılabilirliğinde artış	Groh ve ark., 2019
CIP ve kimyasal temizlik	Kimyasal degradasyon (alkali/oksidatif)	Fragment	Orta	Yüzey Aşınmasının hızlanması	Muncke, 2021
Fermentasyon	pH düşüşü, mikrobiyal aktivite	Agregatlar	Yüksek	Agregasyon ve stabilite değişimi	Jin ve ark., 2019; Yong ve ark., 2020
Protein fazı (kazein, serum proteinleri)	Adsorpsiyon (protein korona oluşumu)	Yüzeyi modifiye partiküller	Çok yüksek	Biyoyararlanım ve hücreler Etkileşim değişimi	Cedervall ve ark., 2007; Monopoli ve ark., 2012
Lipid fazı	Hidrofobik etkileşimler	Faz içinde dağılmış partiküller	Yüksek	Matriks içinde heterojen dağılım	McClements, 2015
Depolama ve ambalaj	Migrasyon, yaşlanma, UV etkisi	Lif, fragment	Orta	Zamanla artan kontaminasyon	Prata ve ark., 2020; EFSA, 2021

Bu tablo, süt ve fermente süt ürünlerinde mikroplastiklerin üretim zinciri boyunca ortaya çıkan başlıca kaynaklarını, bu kaynaklara bağlı oluşum

mekanizmalarını ve partiküllerin gıda matrisi içindeki davranışlarını özetlemektedir. Mikroplastiklerin boyutu, polimer türü ve yüzey özelliklerinin yanı sıra, protein ve lipid fazları ile olan etkileşimleri, partikülün matris içindeki dağılımını, agregasyon eğilimini ve potansiyel biyoyararlanımını belirleyen temel faktörlerdir. Tablo 1, mekanik, termal, kimyasal ve biyolojik süreçlerin mikroplastik davranışı üzerindeki bütüncül etkisini vurgulamakta ve bu partiküllerin statik kontaminantlar değil, proses koşullarına duyarlı dinamik sistemler olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Süt ve fermente süt ürünlerinde mikroplastiklerin süreç temelli davranış modeli

Şekil 1, mikroplastiklerin süt üretim zinciri boyunca kaynaklardan başlayarak proses aşamaları, partikül değişimi ve gıda matrisi ile etkileşimleri sonucunda

dağılım, biyoyararlanım ve potansiyel toksik etkilerinin nasıl şekillendiğini göstermektedir (Guo ve Wang, 2019; Koelmans ve ark., 2022). Mikroplastiklerin statik bir kontaminanttan ziyade, süreçler boyunca sürekli değişim gösteren dinamik bir sistem olduğunu kavramsal olarak ortaya koymaktadır.

5. Süt ve Fermente Gıdalarda Mikroplastiklerin Analitik Belirlenmesi

Süt ve fermente gıdalarda mikroplastiklerin analitik olarak belirlenmesi, yüksek organik içerik, kompleks kolloidal yapı ve düşük partikül konsantrasyonları nedeniyle önemli metodolojik zorluklar içermektedir (Käppler ve ark., 2016; Cowger ve ark., 2020). Bu zorluklar, elde edilen verilerin güvenilirliğini ve çalışmalar arası karşılaştırılabilirliğini doğrudan etkileyen temel sınırlayıcı faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle güvenilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek için örnek hazırlama, kontaminasyon kontrolü, partikül izolasyonu ve polimer doğrulama aşamalarının bütüncül ve standardize bir yaklaşımla yürütülmesi gerekmektedir (Koelmans ve ark., 2019; Hermesen ve ark., 2018).

5.1. Numune Hazırlama ve Organik Matrisin Uzaklaştırılması

Süt ve fermente ürünler; proteinler, lipitler ve karbohidratlar açısından zengin kompleks matrislerdir. Numune hazırlama aşaması, mikroplastik analizinde sonuçların doğruluğunu belirleyen en kritik adımlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle mikroplastiklerin doğru şekilde izole edilebilmesi için organik bileşenlerin etkili biçimde uzaklaştırılması gerekmektedir (Mintenig ve ark., 2017; Löder ve ark., 2017). Bu amaçla literatürde başlıca üç yaklaşım kullanılmaktadır:

- **Kimyasal sindirim (oksidatif/alkalik yöntemler):** Hidrojen peroksit (H_2O_2), potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hipoklorit ($NaClO$) gibi ajanlar kullanılarak organik madde parçalanmaktadır. Ancak güçlü kimyasalların bazı polimer türlerinde degradasyona neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Hurley ve ark., 2018; Käppler ve ark., 2016).

- **Enzimatik sindirim:** Proteinaz K, lipaz ve selüloz gibi enzimler kullanılarak daha selektif bir ayrıştırma sağlanmaktadır. Bu yöntem polimer bütünlüğünü daha iyi korumakta, ancak maliyet ve süre açısından sınırlayıcı olabilmektedir (Löder ve ark., 2017; Mintenig ve ark., 2017).

- **Kombine yaklaşımlar:** Enzimatik ve kimyasal sindirimin birlikte kullanılması, özellikle yüksek yağ ve protein içeren süt ürünlerinde daha etkili sonuçlar verebilmektedir (Zhang ve ark., 2020).

Numune hazırlama aşamasında geri kazanım verimliliğinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu nedenle bilinen polimer partikülleri ile yapılan “spike” deneyleri, yöntemin doğrulanması açısından gereklidir (Cowger ve ark., 2020).

5.2. Kontaminasyon Kontrolü ve Blank Yönetimi

Mikroplastik analizinde en kritik metodolojik sorunlardan biri, analiz sürecinde oluşabilecek sekonder kontaminasyondur (Hermsen ve ark., 2018). Laboratuvar ortamında bulunan hava kaynaklı lifler, kullanılan filtreler, cam malzemeler ve hatta araştırmacıların kıyafetleri bile örneğe mikroplastik bulaşmasına neden olabilmektedir (Dris ve ark., 2016). Bu nedenle analiz sürecinde aşağıdaki önlemler büyük önem taşımaktadır:

- Tüm işlemler mümkün olduğunca laminar akış kabinlerinde gerçekleştirilmelidir (Hermsen ve ark., 2018)
- Plastik malzeme kullanımı minimuma indirilmeli, cam veya metal ekipman tercih edilmelidir (Cowger ve ark., 2020).
- Her analiz serisinde blank (kontrol) örnekler çalışılmalı ve sonuçlar buna göre düzeltilmelidir (Hermsen ve ark., 2018).
- Laboratuvar ortamında hava partikül yükü izlenmelidir (Allen ve ark., 2019).

Blank kontrollerin ihmal edilmesi, özellikle lif formundaki mikroplastiklerin yanlış pozitif sonuçlara yol açabilmesine neden olmaktadır (Hermsen ve ark., 2018).

5.3. Filtrasyon ve Partikül İzolasyonu

Sindirim sonrası mikroplastiklerin ayrılması genellikle filtrasyon ile gerçekleştirilmektedir (Löder ve ark., 2017). Kullanılan filtrelerin gözenek boyutu (örneğin 0.45 μm , 1 μm , 5 μm), tespit edilebilecek partikül boyut aralığını doğrudan belirlemektedir (Cowger ve ark., 2020). Bu durum, farklı çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılmasını zorlaştıran önemli bir faktördür (Koelmans ve ark., 2019).

Yoğunluk ayırma (density separation) teknikleri de bazı çalışmalarda kullanılmaktadır (Imhof ve ark., 2012). Çinko klorür (ZnCl_2) veya sodyum iyodür (NaI) gibi yüksek yoğunluklu çözeltiler kullanılarak plastik partiküller yüzdürülmekte ve ayrıştırılmaktadır (Imhof ve ark., 2012). Ancak süt gibi yoğun kolloidal sistemlerde bu yöntemin etkinliği sınırlı olabilmektedir (Mintenig ve ark., 2017).

5.4. Görsel Tanımlama ve Ön Sınıflandırma

Filtrasyon sonrası elde edilen partiküller genellikle stereomikroskop veya optik mikroskop altında incelenmektedir (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012). Bu aşamada partiküller şekil (lif, fragment, film) ve renk açısından sınıflandırılmaktadır (Frias ve Nash, 2019).

Ancak görsel tanımlama tek başına yeterli değildir. Organik kalıntılar veya doğal partiküller mikroplastiklerle karıştırılabilmektedir (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012). Bu nedenle görsel analiz yalnızca ön sınıflandırma amacıyla kullanılmalı ve mutlaka spektroskopik doğrulama ile desteklenmelidir (Käppler ve ark., 2016).

5.5. FTIR ve Mikro-FTIR Spektroskopisi

Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopisi, mikroplastiklerin polimer türünün belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Käppler ve ark., 2016; Primpke ve ark., 2018). FTIR yöntemi, orta ve büyük boyutlu mikroplastiklerin güvenilir tanımlanmasında temel araçlardan biri olarak kabul edilmektedir. Mikro-FTIR sistemleri, partikül bazlı analiz yapılmasına olanak tanımakta ve özellikle 10–20 µm üzerindeki partiküller için yüksek doğruluk sağlamaktadır (Primpke ve ark., 2018).

FTIR analizinde elde edilen spektrumlar, referans veri tabanları ile karşılaştırılarak polimer tipi belirlenmektedir (Primpke ve ark., 2018). Ancak daha küçük partiküller (<10 µm) için sinyal/gürültü oranı düşmekte ve doğruluk azalmaktadır (Käppler ve ark., 2016).

5.6. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, FTIR'a kıyasla daha küçük partiküllerin analizine olanak tanınması açısından avantajlıdır (Araujo ve ark., 2018; Käppler ve ark., 2016). Özellikle nanoplastik boyutuna yaklaşan partiküllerin tespitinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Araujo ve ark., 2018).

Bununla birlikte Raman analizinde floresans girişimi, özellikle organik madde kalıntısı içeren örneklerde önemli bir sorun oluşturmaktadır (Käppler ve ark., 2016). Bu durum, sinyal kalitesini düşürerek polimer tanımlamasını zorlaştırabilmektedir (Araujo ve ark., 2018).

5.7. Pyrolysis-GC/MS (Py-GC/MS)

Py-GC/MS yöntemi, mikroplastiklerin kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla kullanılan güçlü bir tekniktir (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017). Bu yöntemde örnek yüksek sıcaklıkta pirolize edilerek polimerlerin karakteristik bozunma ürünleri analiz edilmektedir (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017).

Bu yaklaşım, partikül sayısından ziyade kütleli konsantrasyon hakkında bilgi sağlamakta ve özellikle düşük konsantrasyonlu örneklerde avantaj sunmaktadır (Dümichen ve ark., 2015). Ancak numunenin tamamen tahrip edilmesi ve morfolojik bilgi sağlamaması önemli sınırlılıklar olarak değerlendirilmektedir (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017).

5.8. Elektron Mikroskobu ve İleri Teknikler

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), mikroplastiklerin yüzey morfolojisinin detaylı incelenmesine olanak tanımaktadır (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012). SEM, genellikle enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile birlikte kullanılarak elementel analiz yapılmasını da mümkün kılmaktadır (Hidalgo-Ruz ve ark., 2012). SEM analizleri, mikroplastiklerin yüzey özelliklerinin ve degradasyon durumunun anlaşılmasında önemli katkı sağlamaktadır.

Son yıllarda nanoplastiklerin tespiti için AFM (Atomic Force Microscopy) ve nanopartikül izleme analizleri (NTA) gibi ileri teknikler de kullanılmaya başlanmıştır (Gigault ve ark., 2018; Koelmans ve ark., 2019). Ancak bu yöntemler henüz rutin analizlerde yaygın olarak kullanılmamaktadır (Koelmans ve ark., 2019).

5.9. Yöntemsel Heterojenlik ve Standardizasyon Sorunu

Mikroplastik analizinde en büyük sorunlardan biri yöntemsel standardizasyon eksikliğidir (Koelmans ve ark., 2019; Cowger ve ark., 2020). Farklı çalışmalar arasında numune hazırlama protokolleri, filtre boyutları, analitik teknikler ve raporlama birimleri önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Cowger ve ark., 2020). Bu durum, aynı gıda türü için bildirilen mikroplastik seviyeleri arasında büyük varyasyonlara yol açabilmektedir (Koelmans ve ark., 2019).

Bu nedenle elde edilen verilerin karşılaştırılması ve genel eğilimlerin yorumlanması dikkatle yapılmalıdır. Alanın ilerleyebilmesi için uluslararası düzeyde kabul gören standart analiz protokollerinin geliştirilmesi kaçınılmazdır (Koelmans ve ark., 2019). Bu bağlamda, mikroplastik analizinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, hangi yaklaşımın hangi koşullarda daha uygun olduğunu ortaya koymak açısından önem taşımaktadır.

Tablo 2. Süt ve fermente süt ürünlerinde mikroplastiklerin analitik belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntemler ve özellikleri

Yöntem	Prensip	Avantajları	Sınırlamaları	Uygun Partikül Boyutu	Sağladığı Bilgi
Kimyasal sindirim (H₂O₂, KOH)	Organik matriksin parçalanması	Hızlı, yaygın	Polimer degradasyon riski	Tüm boyutlar	Analiz için organik matriksin uzaklaştırılması
Enzimatik sindirim	Spesifik biyomolekül parçalanması	Polimeri korur	Pahalı, zaman alıcı	Tüm boyutlar	Analiz için organik matriksin uzaklaştırılması
Filtrasyon	Boyuta göre ayırma	Basit, ucuz	Küçük partikül kaybı	>0.45 µm	İzolasyon
Yoğunluk ayırma	Yoğunluk farkı	Etkili ayırım	Süt matriksinde sınırlı	Orta–büyük	İzolasyon
Görsel analiz (mikroskop)	Şekil/rengi inceleme	Hızlı ön değerlendirme	Yanlış pozitif riski	>50 µm	Morfoloji
FTIR / Mikro-FTIR	IR spektrum analizi	Güvenilir polimer tanımları	<10 µm sınırlı	>10–20 µm	Polimer türü
Raman spektroskopisi	Moleküler titreşim analizi	Küçük partiküller	Floresans sorunu	<10 µm	Polimer türü
Py-GC/MS	Termal bozunma analizi	Çok hassas, kütleli analiz	Numune yok olur	Tüm boyutlar	Kimyasal kompozisyon
SEM-EDS	Yüzey görüntüleme + element analizi	Detaylı morfoloji	Polimer tanımları sınırlı	Mikro	Yüzey yapısı
AFM / NTA	Nano ölçekte analiz	Nanoplastik tespiti	Rutin değil	Nano	Boyut, dağılım

Bu tablo, mikroplastik analizinde kullanılan yöntemlerin tek başına yeterli olmadığını ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için çok aşamalı ve entegre yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yöntemlerin her biri farklı analitik amaçlara hizmet etmektedir. FTIR polimer doğrulama çalışmalarında, Raman spektroskopisi polimer türünün belirlenmesi amacıyla ve Py-GC/MS ise kütleli kompozisyonu belirlemek için tercih edilir.

5.10. Nanoplastiklerin Analitik Olarak Belirlenmesindeki Zorluklar

Nanoplastikler, mevcut analitik yöntemlerin sınırlarını zorlayan partiküller olarak değerlendirilmektedir (Gigault ve ark., 2018). Boyutlarının çok küçük olması nedeniyle klasik filtrasyon ve spektroskopik yöntemlerle tespit edilmeleri oldukça güçtür (Koelmans ve ark., 2019). Bu durum, nanoplastik maruziyetinin sistematik olarak eksik tahmin edilmesine yol açmaktadır (SAPEA, 2019). Dolayısıyla mevcut mikroplastik verilerinin, toplam plastik maruziyetinin yalnızca bir kısmını yansıttığı ve nanoplastiklerin önemli ölçüde göz ardı edildiği kabul edilmelidir (EFSA, 2021).

6. Gıda Matrisi–Mikroplastik Etkileşimleri

Gıda sistemlerinde mikroplastiklerin davranışı, yalnızca partikülün boyutu ve polimer türü ile değil, aynı zamanda bulunduğu matrisin fizikokimyasal özellikleri ile belirlenmektedir (Guo ve ark., 2020; Koelmans ve ark., 2022). Süt ve fermente gıdalar; protein, lipid ve karbonhidrat fazlarının birlikte bulunduğu kompleks kolloidal sistemler olmaları nedeniyle mikroplastik–matris etkileşimlerinin en belirgin şekilde gözlemlenebileceği ortamlardır (McClements ve Xiao, 2017). Bu nedenle bu sistemlerde mikroplastik davranışının anlaşılması, yalnızca kontaminasyon düzeyinin belirlenmesi açısından değil, aynı zamanda biyoyararlanım ve toksikolojik etki mekanizmalarının yorumlanması açısından da kritik öneme sahiptir (Bhattacharya ve ark., 2010; Guo ve Wang, 2019).

6.1. Protein Corona Oluşumu ve Yüzey Etkileşimleri

Mikroplastikler biyolojik ortamlara girdiklerinde, yüzeyleri hızla proteinler ve diğer biyomoleküller tarafından kaplanarak “protein corona” adı verilen dinamik bir yapı oluşturmaktadır (Cedervall ve ark., 2007; Monopoli ve ark., 2012). Süt sistemlerinde bu yapı, başlıca kazein miselleri ve serum proteinleri (β -laktoglobulin, α -laktalbumin vb.) tarafından şekillendirilmektedir (Fox ve McSweeney, 2015).

Protein corona oluşumu, mikroplastiklerin yüzey yükünü (zeta potansiyeli), hidrofobitesini, agregasyon eğilimini ve hücrel tanınma ile alım mekanizmalarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Tenzer ve ark., 2013; Walkey ve Chan, 2012). Bu durum, partiküllerin biyolojik sistemlerle etkileşimini doğrudan etkileyen kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Kazein misellerinin kolloidal yapısı ve yüzey aktif özellikleri, mikroplastiklerin matris içinde stabil hale gelmesine veya belirli bölgelerde yoğunlaşmasına neden olabilmektedir (McClements, 2015). Ayrıca protein corona yapısı, partiküllerin sindirim sistemindeki davranışını da modifiye edebilmektedir (Lundqvist ve ark., 2008).

6.2. Lipid Fazı ile Etkileşim

Süt ve süt ürünlerinde bulunan yağ globülleri, mikroplastiklerle etkileşimde önemli rol oynayan bir diğer fazdır (McClements, 2015). Hidrofobik yüzey özelliklerine sahip mikroplastikler, lipid fazına daha yüksek afinite göstererek bu faz içerisinde tutulabilmektedir (Guo ve ark., 2020).

Bu durumun iki önemli sonucu bulunmaktadır:

1. Mikroplastiklerin ürün içerisinde heterojen dağılım göstermesi

2. Yağ fazı ile birlikte sindirim sırasında farklı taşınım mekanizmalarına maruz kalması (Guo ve Wang, 2019)

Özellikle yüksek yağ içeriğine sahip ürünlerde (örneğin bazı peynir türleri), mikropplastiklerin lipid fazı ile birlikte daha stabil kalabileceği ve sindirim sırasında farklı biyoyararlanım profilleri sergileyebileceği düşünülmektedir (Zhang ve ark., 2021).

6.3. Fermentasyon ve Mikrobiyal Etkileşimler

Fermente süt ürünleri, mikropplastik–mikrobiyotik etkileşimlerinin incelenmesi açısından son derece özgün sistemler olarak değerlendirilmektedir (Marco ve ark., 2017). Bu sistemlerde mikroorganizmalar yalnızca ortamı değiştirmekle kalmaz, aynı zamanda partiküllerle doğrudan etkileşime girebilmektedir (Yong ve ark., 2020).

6.3.1. Mikrobiyal Adezyon ve Biyofilm Oluşumu

Mikropplastik yüzeyleri, mikroorganizmalar için adezyon platformu sağlayabilmektedir (Rummel ve ark., 2017). Bu durum, mikropplastiklerin “mikrobiyal taşıyıcı” (vector) olarak davranmasına yol açabilmektedir (Keswani ve ark., 2016). Özellikle laktik asit bakterileri ve bazı maya türleri, mikropplastik yüzeylerine bağlanarak biyofilm benzeri yapılar oluşturabilmektedir (Zettler ve ark., 2013; Amaral-Zettler ve ark., 2020).

Bu etkileşimlerin sonuçları henüz tam olarak bilinmemekle birlikte, probiyotik bakterilerin canlılığı, adezyon kapasitesi ve metabolik aktivitesi üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir (Yong ve ark., 2020).

6.3.2. Ekzopolisakkarit (EPS) Etkisi

Fermentasyon sırasında üretilen ekzopolisakkaritler, mikropplastiklerin matriks içerisindeki hareketini sınırlayabilir veya partiküllerin bir araya gelerek agregat oluşturmaya neden olabilmektedir (Patel ve ark., 2012; Zhai ve ark., 2021). EPS yapıları, mikropplastiklerin fiziksel olarak “kapsüllenmesine” yol açarak onların biyoyararlanımını değiştirebilmektedir (Zhai ve ark., 2021).

6.3.3. pH ve İyonik Ortam Değişimi

Fermentasyon sürecinde pH’nın düşmesi, mikropplastiklerin yüzey yükünü ve kolloidal stabilitesini etkileyebilmektedir (Koelmans ve ark., 2022). Düşük pH koşullarında partiküller arası elektrostatik itme azalabilir ve agregasyon eğilimi artabilmektedir (Guo ve ark., 2020). Bu durum, partikül boyut dağılımının değişmesine ve analiz sonuçlarının etkilenmesine neden olabilmektedir (Jin ve ark., 2019).

6.4. Kolloidal Stabilite ve Agregasyon Davranışı

Süt sistemleri kolloidal yapıda olduğundan, mikroplastiklerin bu sistem içindeki davranışı klasik çözelti kimyasından farklıdır (McClements ve Xiao, 2017). Van der Waals kuvvetleri, elektrostatik etkileşimler ve sterik stabilizasyon mekanizmaları, partiküllerin agregasyon veya dispersiyon durumunu belirlemektedir (Bhattacharjee, 2016).

Protein corona ve lipid etkileşimleri, partiküllerin kolloidal stabilitesini artırabilir veya tersine agregasyonu teşvik edebilmektedir (Monopoli ve ark., 2012). Bu durum, mikroplastiklerin matriks içinde serbest partiküller mi yoksa agregat yapılar halinde mi bulunduğunu belirlemektedir.

6.5. Sindirim Sürecinde Mikroplastik Davranışı

Gıda matrisi ile etkileşimler, mikroplastiklerin sindirim sistemi içerisindeki davranışını doğrudan etkilemektedir (EFSA, 2021). Sindirim süreci boyunca mide asidi (düşük pH), enzimatik sindirim ve safra tuzları mikroplastiklerin yüzey özelliklerini ve bağlanma durumlarını değiştirebilmektedir (Jin ve ark., 2019; Guo ve ark., 2020).

Protein corona yapısı sindirim sırasında parçalanabilir veya yeniden düzenlenebilir (Lundqvist ve ark., 2008). Lipid fazına bağlı mikroplastikler, lipaz aktivitesi ile serbest hale geçebilmektedir (McClements, 2015). Bu süreçler, mikroplastiklerin bağırsak epitel hücreleri ile temasını ve potansiyel emilimini etkileyebilmektedir.

6.6. Biyoyararlanım ve Hücresel Alım Mekanizmaları

Mikroplastiklerin biyoyararlanımı büyük ölçüde partikül boyutuna bağlıdır (EFSA, 2021). Mikro boyuttaki partiküllerin büyük kısmı gastrointestinal sistemden atılırken, daha küçük partiküller ve özellikle nanoplastikler; endositoz, paracellular geçiş ve M hücreleri aracılığıyla taşınma gibi mekanizmalarla epitel bariyerini aşabilmektedir (Wright ve Kelly, 2017; Yong ve ark., 2020).

Protein corona ve matriks bileşenleri, bu alım mekanizmalarını modifiye edebilmektedir (Monopoli ve ark., 2012). Örneğin protein kaplı partiküller, hücreler tarafından daha kolay tanınabilir ve içeri alınabilmektedir. Bu durum, özellikle nanoplastiklerin insan sağlığı açısından daha yüksek risk potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir.

6.7. Taşıyıcı Rol ve Kombine Maruziyet

Mikroplastikler yalnızca kendi başlarına değil, aynı zamanda adsorbe ettikleri kimyasallar ile birlikte değerlendirilmelidir (Rochman ve ark., 2013; Koelmans ve ark., 2016). Süt ürünleri gibi kompleks matrislerde ağır metaller, pestisit

kalıntıları ve plastik katkı maddeleri mikroplastik yüzeyine bağlanarak birleşik maruziyet oluşturabilmektedir (Bakir ve ark., 2014).

Bu durum, toksikolojik etkilerin yalnızca partikül varlığı ile değil, aynı zamanda taşınan kimyasal yük ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Koelmans ve ark., 2016).

6.8. Matris-Spesifik Etkileşimlerin Önemi

Süt ve fermente gıdalarda mikroplastik davranışı, diğer gıda matrislerinden farklılık göstermektedir (Guo ve Wang, 2019). Bu nedenle genel mikroplastik literatüründen elde edilen bulguların doğrudan bu sistemlere uygulanması sınırlı olabilmektedir.

Matris-spesifik çalışmaların eksikliği, bu alandaki en önemli bilgi boşluklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Koelmans ve ark., 2022). Özellikle fermente sistemlerde mikroplastik davranışının deneysel olarak incelenmesi, gelecekteki araştırmalar için öncelikli alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu yaklaşım, mikroplastiklerin gıda sistemlerindeki etkilerinin doğru şekilde anlaşılabilmesi için matris-temelli ve disiplinler arası çalışmaların gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

7. Mikroplastiklere Maruziyet Yolları ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Toksikolojik Etkiler

Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri, son yıllarda hızla artan araştırma sayısına rağmen hâlen önemli belirsizlikler içeren bir alan olarak değerlendirilmektedir (Vethaak ve Legler, 2021; Leslie ve ark., 2022). Bu belirsizliklerin temelinde, maruziyetin doğru şekilde nicelendirilmesindeki zorluklar, analitik sınırlılıklar ve mevcut toksikolojik verilerin büyük ölçüde in vitro veya deneysel hayvan modellerine dayanması yer almaktadır (EFSA, 2021; WHO, 2019). Bununla birlikte mevcut literatür, mikroplastiklerin yalnızca fiziksel partiküller olarak değil, aynı zamanda biyolojik sistemlerle çok boyutlu etkileşimler kurabilen kompleks yapılar olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Yong ve ark., 2020; Sharma ve Chatterjee, 2017). Başka bir deyişle, mikroplastiklerin insanlara maruziyeti yalnızca kontaminasyon düzeyi ile sınırlı olmayıp, partikül özellikleri, gıda matrisi ile etkileşimleri ve sindirim sürecindeki davranışları ile birlikte şekillenmektedir.

Bu nedenle mikroplastiklerin potansiyel sağlık etkilerinin değerlendirilmesi, maruziyet–davranış–biyolojik etki ilişkisini bütüncül bir çerçevede ele alan yaklaşımları gerektirmektedir.

7.1. İnsan Maruziyet Yolları ve Gıda Kaynaklı Alım

İnsanların mikroplastiklere maruziyeti başlıca üç ana yol üzerinden gerçekleşmektedir:

- Oral alım (gıda ve içecekler),
- İnhalasyon (hava yoluyla soluma) (hava kaynaklı partiküller) ve
- Dermal (cilt yoluyla) temas (Cox ve ark., 2019; Prata ve ark., 2020).

Bu yollar arasında gıda kaynaklı maruziyet, özellikle sürekli ve düşük dozlu kronik alım açısından en önemli bileşenlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Senathirajah ve ark., 2021).

Süt ve fermente gıdalar, günlük diyetin önemli bir parçasını oluşturduklarından, mikroplastik maruziyetine katkıları göz ardı edilemeyecek düzeydedir (Toussaint ve ark., 2019). Bununla birlikte bu ürünlere özgü maruziyet verileri sınırlıdır ve çoğu çalışma genel gıda kategorileri üzerinden değerlendirme yapmaktadır (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020). Bu durum, süt ürünlerine özgü maruziyetin sistematik olarak eksik temsil edilmesine yol açmaktadır.

7.2. Sindirim Sistemi Boyunca Mikroplastik Davranışı

Mikroplastiklerin gastrointestinal sistemdeki davranışı, partikül boyutu, yüzey özellikleri ve gıda matrisi ile etkileşimlerine bağlı olarak değişmektedir (Guo ve ark., 2020; Jin ve ark., 2019). Sindirim süreci boyunca mikroplastikler mide ortamında düşük pH'a maruz kalmakta, ince bağırsakta enzimatik sindirim ve safra tuzları ile etkileşmekte ve kolonik mikrobiyota ile temas etmektedir (EFSA, 2021).

Bu süreçler, mikroplastiklerin yüzey özelliklerini ve biyolojik etkileşim kapasitesini modifiye edebilmektedir (Yong ve ark., 2020). Büyük partiküllerin önemli bir kısmı gastrointestinal sistemden atılmakla birlikte, daha küçük boyuttaki partiküller ve özellikle nanoplastikler bağırsak epitel bariyerini aşabilmektedir (Wright & Kelly, 2017; Deng ve ark., 2017). Bu geçiş, başlıca endositoz, paracellular geçiş ve M hücreleri aracılığıyla taşınma gibi mekanizmalarla gerçekleşmektedir (Powell ve ark., 2010; Yong ve ark., 2020). Mikroplastiklerin sindirim sistemi boyunca sergilediği davranış, yalnızca partikül özelliklerine değil, aynı zamanda gıda matrisi ile etkileşimlerine bağlı olarak şekillenmekte ve biyoyararlanım ile potansiyel sistemik etkilerin belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır.

7.3. Sistemik Dağılım ve Doku Birikimi

Mikroplastiklerin bağırsak bariyerini aşması durumunda, dolaşım sistemine katılarak farklı dokulara taşınabileceği düşünülmektedir (Wright ve Kelly, 2017). Deneysel hayvan çalışmalarında mikroplastiklerin karaciğer, böbrek ve dalak gibi organlarda birikebildiği gösterilmiştir (Deng ve ark., 2017).

Son yıllarda insan biyolojik örneklerinde (kan, dışkı, plasenta gibi) mikroplastiklerin tespit edilmesi, bu partiküllerin sistemik dolaşıma geçebildiğini desteklemektedir (Leslie ve ark., 2022; Ragusa ve ark., 2021). Bununla birlikte bu bulguların klinik anlamı ve uzun dönem sonuçları henüz netlik kazanmamıştır (Vethaak ve Legler, 2021). Mikroplastiklerin insan vücudunda yalnızca geçici maruziyet unsurları değil, aynı zamanda belirli dokularda birikim potansiyeline sahip partiküller olarak görülmesi gerekmektedir.

7.4. Oksidatif Stres ve Hücresel Yanıtlar

Mikroplastiklerin en yaygın rapor edilen biyolojik etkilerinden biri oksidatif stres indüksiyonudur (Schirinz ve ark., 2017; Yang ve ark., 2019). Partiküllerin hücre içine alınması, reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini artırarak lipid peroksidasyonu, DNA hasarı ve protein oksidasyonu gibi hücresel hasar mekanizmalarını tetikleyebilmektedir (Yang ve ark., 2019).

Oksidatif stres, aynı zamanda inflamatuvar yanıtların başlatılmasında da önemli rol oynamakta ve kronik maruziyet durumunda doku hasarına yol açabilmektedir (Hussain ve ark., 2021). Dolayısıyla mikroplastiklerin hücresel düzeyde oluşturduğu oksidatif stres, yalnızca akut hücresel yanıtlarla sınırlı kalmayıp, uzun vadede inflamasyon ve doku fonksiyon bozukluklarına katkı sağlayabilecek temel mekanizmalardan biri olarak değerlendirilebilir.

7.5. İnflamasyon ve Bağırsak Bariyer Fonksiyonu

Mikroplastiklerin bağırsak epitel hücreleri ile etkileşimi, inflamatuvar sitokinlerin üretimini artırabilmektedir (Jin ve ark., 2019). Bu durum, bağırsak bariyer bütünlüğünün bozulmasına ve “geçirgen bağırsak” (leaky gut) fenomenine katkıda bulunabilmektedir (Lu ve ark., 2018).

Bağırsak bariyerinin zayıflaması, yalnızca mikroplastiklerin değil, aynı zamanda diğer toksik bileşenlerin de sistemik dolaşıma geçişini kolaylaştıracağı düşünülmektedir (Turner, 2009).

7.6. Mikrobiyota Üzerindeki Etkiler

Bağırsak mikrobiyotası, insan sağlığı açısından kritik bir rol oynamaktadır (Valdes ve ark., 2018). Mikroplastiklerin mikrobiyota kompozisyonunu ve fonksiyonunu değiştirebileceğine dair bulgular giderek artmaktadır (Jin ve ark.,

2019; Lu ve ark., 2018). Deneysel alıřmalar, mikroplastik maruziyetinin mikrobiyal çeřitlilięi azaltabileceęini, faydalı bakterilerin oranını dūřurebileceęini ve patojen bakterilerin baskın hale gelmesine yol açabileceęini gōstermektedir (Jin ve ark., 2019). Ancak bu etkilerin insanlarda ne ölçūde gerçekleřtięi henūz net deęildir.

Mikrobiyota üzerindeki deęiřimlerin yalnızca lokal baęırsak saęlıęı ile sınırlı kalmayıp, metabolik, immūnolojik ve nōrolojik sūreleri de etkileyebileceęi gōz önünde bulundurulmalıdır. Mikroplastik–mikrobiyota etkileřimleri, baęırsak bariyer fonksiyonu, inflamasyon ve sistemik daęılım sūreleri ile birlikte deęerlendirildięinde, bu partikūllerin insan saęlıęı üzerindeki etkilerinin çok boyutlu bir yapıya sahip olduęu anlařılmaktadır.

7.7. Endokrin ve Metabolik Etkiler

Mikroplastikler, tařıdıkları katkı maddeleri (örneęin bisfenoller, ftalatlar) aracılıęıyla endokrin bozucu etkiler gōsterebilmektedir (Rochman ve ark., 2013; Hahladakis ve ark., 2018). Bu bileřikler hormon reseptōrleri ile etkileřerek hormonal dengeyi bozabilir, metabolik sūreleri etkileyebilir ve ūreme saęlıęı üzerinde olumsuz etkiler oluřturabilir (Galloway ve ark., 2017). Endokrin bozucu etkilerin uzun vadeli ve dūřuk dozlu maruziyetlerde ortaya çıkabilmesi, mikroplastiklerin kronik saęlık etkilerinin deęerlendirilmesini daha da karmařık hale getirmektedir.

Bu durum, mikroplastiklerin yalnızca partikūl bazlı değil, aynı zamanda adsorbe ettikleri kimyasal bileşenler aracılığıyla birleşik maruziyet oluşturan sistemler olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

7.8. Kombine Maruziyet ve Vektōr Etkisi

Mikroplastikler, evresel kirleticileri adsorbe ederek “tařıyıcı” rol ūstlenebilmektedir (Bakir ve ark., 2014; Koelmans ve ark., 2016). Bu durum, tekil maruziyet yerine çoklu maruziyet senaryolarını gūndeme getirmektedir. Mikroplastik yūzeyine baęlanan aęır metaller, pestisitler ve organik kirleticiler, sindirim sistemi boyunca birlikte tařınarak biyoyararlanımı artırabilmektedir (Guo ve Wang, 2019).

Bu nedenle mikroplastiklerin toksikolojik deęerlendirilmesi yalnızca partikūl bazlı deęil, aynı zamanda tařıdıkları kimyasal yūk ile birlikte yapılmalıdır.

7.9. Doz–Yanıt İlişkisi ve Maruziyet Belirsizlikleri

Mikroplastiklerin insan saęlıęı üzerindeki etkilerinin deęerlendirilmesinde en būyūk zorluklardan biri, gerçek maruziyet dūzeylerinin belirlenememesidir (EFSA, 2021). Farklı çalıřmalarda bildirilen mikroplastik miktarları, kullanılan

yöntemlere bağılı olarak büyük farklılıklar göstermektedir (Koelmans ve ark., 2019).

Ayrıca doz–yanıt ilişkisine dair veriler sınırlıdır. Özellikle kronik düşük doz maruziyetin uzun dönem etkileri henüz net olarak ortaya konmamıştır (Vethaak ve Legler, 2021). Bu durum, risk değerlendirmesinin önemli ölçüde belirsizlik içermesine neden olmaktadır.

7.10. Risk Değerlendirme Perspektifi

Mevcut veriler ışığında mikropplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri konusunda kesin bir risk değerlendirmesi yapmak henüz mümkün değildir (EFSA, 2021; WHO, 2019). Bununla birlikte biyoyararlanım potansiyeli, toksikolojik mekanizmalar ve yaygın maruziyet birlikte değerlendirildiğinde, mikropplastiklerin “ihmal edilebilir” bir risk olarak görülmemesi gerektiği açıktır (Vethaak ve Legler, 2021).

Dolayısıyla maruziyetin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi, analitik yöntemlerin standardizasyonu ve özellikle gıda üretim zincirinde kontaminasyonun kontrol altına alınması kritik öncelikler arasında yer almalıdır.

8. Literatürün Eleştirel Analizi ve Metodolojik Sınırlılıklar

Mikropplastiklerin gıda sistemlerindeki varlığına ilişkin çalışmalar son yıllarda hızlı bir artış göstermiştir. Ancak bu gelişme metodolojik derinlik ve karşılaştırılabilirlik açısından aynı ölçüde bir olgunlaşma sergilememiştir (Cowger ve ark., 2020; Koelmans ve ark., 2022). Özellikle süt ve fermente süt ürünleri bakımından mevcut çalışmalar incelendiğinde, elde edilen bulguların önemli ölçüde parçalı ve metodolojik olarak heterojen olduğu görülmektedir (Kutralam-Muniasamy ve ark., 2020; Luo ve ark., 2022).

Mevcut literatürdeki en temel sorunlardan biri, analitik yaklaşımlar arasındaki belirgin uyumsuzluktur (Koelmans ve ark., 2019; Cowger ve ark., 2020). Numune hazırlama protokolleri, sindirim yöntemleri, filtrasyon eşikleri, spektroskopik doğrulama teknikleri ve raporlama birimleri çalışmalar arasında ciddi farklılıklar göstermektedir (Mintenig ve ark., 2017; Hermesen ve ark., 2018). Bu durum, aynı gıda kategorisi için bildirilen mikropplastik seviyelerinin doğrudan karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak birçok çalışmada geri kazanım verimliliğinin sistematik olarak raporlanmaması veya validasyon süreçlerinin yetersiz kalması, elde edilen verilerin güvenilirliğini sınırlamaktadır (Hurley ve ark., 2018; Cowger ve ark., 2020). Bu nedenle mevcut mikropplastik konsantrasyonlarının mutlak değerler olarak değil, daha çok yaklaşık göstergeler olarak değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmı, mikroplastiklerin gıdalarda varlığını göstermekle sınırlı kalmakta; kontaminasyonun kaynağı, süreç dinamikleri ve partikül davranışına ilişkin derinlemesine analizler sınırlı düzeyde kalmaktadır (Prata ve ark., 2020; Guo ve ark., 2020). Süt ve fermente gıdalar gibi çok aşamalı üretim sistemlerinde, mikroplastiklerin yalnızca son üründe tespit edilmesi, kontaminasyonun hangi aşamada ve hangi mekanizmalarla gerçekleştiğini açıklamak açısından yeterli değildir (Muncke, 2021). Bu nedenle gelecekteki çalışmaların, proses bazlı izleme ve kaynak ayrıştırma yaklaşımlarına yönelmesi gerekmektedir (Koelmans ve ark., 2022).

Mikroplastik araştırmalarının büyük bölümü deniz ürünleri ve içme suyu üzerine yoğunlaşmışken, süt ve fermente süt ürünlerinin literatürde görece sınırlı şekilde temsil edildiği görülmektedir (Senathirajah ve ark., 2021; Toussaint ve ark., 2019). Oysa bu ürünler; yüksek tüketim sıklığı, kompleks üretim süreçleri, dinamik ve değişken biyokimyasal yapıları nedeniyle mikroplastik maruziyeti açısından önemli bir konuma sahiptir. Bu karmaşıklık, gıda kaynaklı maruziyetin değerlendirilmesinde sistematik bir eksikliğe yol açabilmektedir (Cox ve ark., 2019).

Fermente süt ürünleri, mikroplastik davranışının değerlendirilmesi açısından özgün ve karmaşık sistemler sunmaktadır (Yong ve ark., 2020; Marco ve ark., 2017). Fermentasyon süreci boyunca gerçekleşen pH değişimi, mikrobiyal metabolizma ve koloidal yeniden yapılaşma gibi faktörler, mikroplastiklerin fizikokimyasal özelliklerini değiştirebilmektedir (Jin ve ark., 2019). Buna rağmen bu sistemlere yönelik deneysel çalışmaların sınırlı olması, önemli bir bilgi boşluğuna işaret etmektedir. Mikroplastik–mikrobiyota etkileşimlerinin hem gıda kalitesi hem de insan sağlığı açısından taşıdığı potansiyel önem göz önüne alındığında, bu alanın öncelikli araştırma konularından biri olduğu anlaşılmaktadır (SAPEA, 2019).

Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı mikroplastiklere odaklanmakta, nanoplastikler ise analitik zorluklar nedeniyle çoğunlukla değerlendirme dışı bırakılmaktadır (Gigault ve ark., 2018; Koelmans ve ark., 2019). Oysa nanoplastiklerin daha yüksek reaktiviteye sahip olması, biyolojik bariyerleri aşabilmesi ve hücresel düzeyde etkileşim gösterebilmesi, bu partiküllerin toksikolojik açıdan daha kritik olabileceğini göstermektedir (Wright ve Kelly, 2017).

Mikroplastiklerin toksikolojik etkilerine ilişkin mevcut bilgiler büyük ölçüde in vitro çalışmalar ve deneysel hayvan modellerine dayanmaktadır (EFSA, 2021; Vethaak & Legler, 2021). Bu çalışmalar önemli mekanistik bilgiler sağlamakla birlikte, insan sağlığına doğrudan genellenmesi sınırlıdır. Özellikle kullanılan partikül konsantrasyonlarının gerçekçi olmaması, model sistemlerin insan

fizyolojisini tam yansıtmaması ve kronik maruziyet faktörlerinin yeterince incelenmemesi, mevcut verilerin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır (Hussain ve ark., 2021).

Birçok çalışma mikroplastik davranışını basit sistemler üzerinden değerlendirmekte, gıda matriksinin etkisini yeterince dikkate almamaktadır (Guo ve ark., 2020). Oysa süt ve fermente gıdalar gibi kompleks sistemlerde protein, lipid ve mikrobiyal bileşenler mikroplastik davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir (McClements ve Xiao, 2017). Bu nedenle genel mikroplastik literatüründen elde edilen bulguların doğrudan gıda sistemlerine uygulanması sınırlı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Koelmans ve ark., 2022).

Mevcut bilgi boşlukları doğrultusunda gelecekteki çalışmaların analitik yöntemlerin standardizasyonu ve validasyonu, nanoplastiklerin güvenilir şekilde tespiti, proses bazlı kontaminasyon izleme çalışmaları, fermente sistemlerde mikroplastik–mikrobiyotaya etkileşimleri, uzun dönem düşük doz insan maruziyeti ve matriks-spesifik biyoyararlanım ile toksikokinetik süreçler gibi alanlara odaklanması önem taşımaktadır (Koelmans ve ark., 2022; EFSA, 2021).

Bu bölüm, mevcut literatürü yalnızca özetlemekle kalmayıp, süt ve fermente gıdalar bağlamında mikroplastik araştırmalarının temel metodolojik ve kavramsal sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Süreç temelli yaklaşımın vurgulanması, matriks-spesifik etkileşimlerin ön plana çıkarılması ve fermente sistemlerdeki araştırma boşluklarının tanımlanması, bu bölümün temel katkıları arasında yer almaktadır.

9. Sonuç ve Gelecek Perspektifler

9.1. Sonuç

Bu bölümde, süt ve fermente süt ürünlerinde mikroplastiklerin kaynakları, üretim süreçleri boyunca sergiledikleri davranış ve potansiyel sağlık etkileri, süreç temelli ve matriks-spesifik bir bakış açısıyla ele alınmıştır.

Yapılan değerlendirmeler, mikroplastiklerin gıda sistemlerinde yalnızca pasif kontaminantlar olmadığını, aksine üretim süreçleri ve gıda matriksi ile etkileşim halinde dinamik bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, mikroplastiklerin değerlendirilmesinde matriks-temelli yaklaşımların benimsenmesi, üretim süreçlerinde kontaminasyonun kontrolüne yönelik stratejilerin geliştirilmesi ve özellikle uzun dönem insan maruziyetine odaklanan araştırmaların artırılması gerekliliği öne çıkmaktadır.

9.2. Genel Değerlendirme ve Kavramsal Perspektif

Bu bölümde ele alınan bulgular, mikroplastiklerin gıda sistemlerinde yalnızca pasif kirleticiler olarak değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Mevcut literatür, mikroplastiklerin üretim süreçleri, fizikokimyasal koşullar ve gıda matrisi ile sürekli etkileşim halinde olan dinamik partikül sistemleri olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Özellikle süt ve fermente süt ürünleri, mikroplastik davranışının anlaşılması açısından özgün model sistemler sunmaktadır. Bu sistemler, kompleks kolloidal yapı, aktif mikrobiyal metabolizma ve süreç boyunca değişen pH, iyonik güç ve matris bileşimi gibi parametreler nedeniyle mikroplastiklerin yüzey özelliklerini, agregasyon davranışını ve biyoyararlanımını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu durum, mikroplastiklerin gıda sistemlerindeki davranışının statik bir kontaminasyon modeli ile açıklanamayacağını ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, mikroplastik araştırmalarında klasik “var/yok” veya “konsantrasyon” temelli yaklaşımların ötesine geçilmesi gerekmektedir. Bunun yerine, üretim zinciri boyunca gerçekleşen mekanik, termal, kimyasal ve biyolojik süreçlerin mikroplastik oluşumu, dönüşümü ve matris içi etkileşimleri üzerindeki etkilerini birlikte değerlendiren süreç-temelli yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır.

Gelecekteki çalışmaların, analitik yöntemlerin standardizasyonuna odaklanmasının yanı sıra, mikroplastik–matris etkileşimlerinin moleküler düzeyde aydınlatılması, nanoplastiklerin davranışının daha hassas yöntemlerle belirlenmesi ve özellikle uzun dönem insan maruziyetinin etkilerinin ortaya konulmasına yönelmesi gerekmektedir. Ayrıca, mikroplastiklerin gıda sistemlerindeki davranışının modellenmesine yönelik bütüncül ve disiplinler arası yaklaşımlar, bu alandaki bilgi boşluklarının giderilmesinde kritik rol oynayacaktır.

Sonuç olarak, süt ve fermente süt ürünleri bağlamında mikroplastiklerin değerlendirilmesi, yalnızca kontaminasyon düzeylerinin belirlenmesi ile sınırlı kalmamalı; aynı zamanda bu partiküllerin süreç boyunca geçirdiği dönüşümler ve gıda matrisi ile etkileşimleri dikkate alınarak çok boyutlu bir perspektifle ele alınmalıdır.

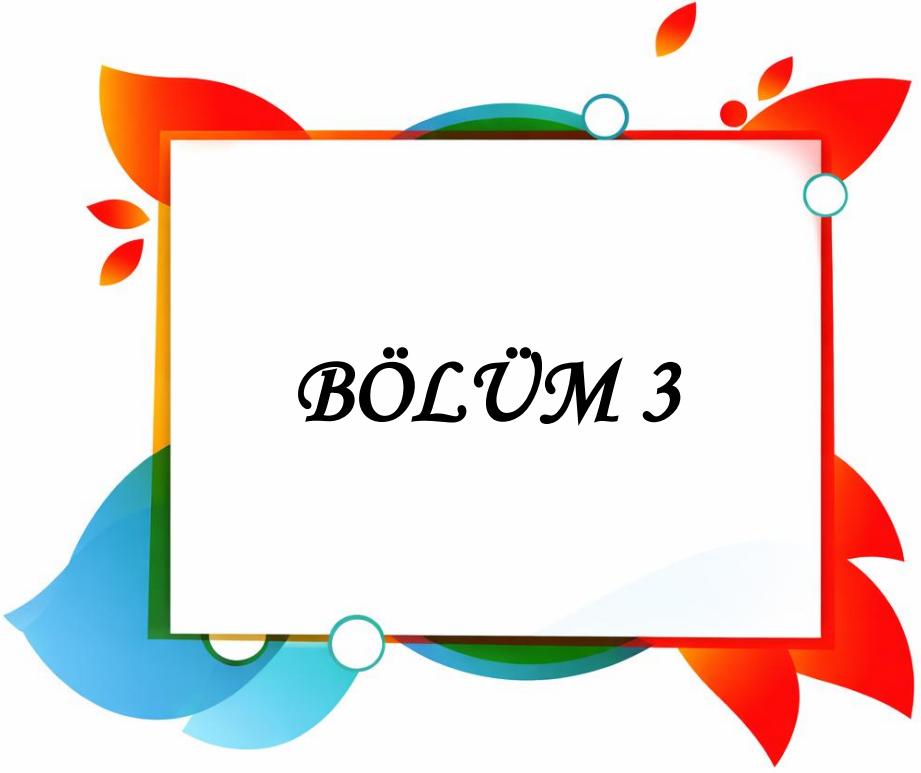
KAYNAKÇA

- Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R., & Mincer, T. J. (2020). Microbial communities on plastic debris (the plastisphere). *Nature Reviews Microbiology*, 18(3), 139–151. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0308-0>
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Jiménez, P. D., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12, 339–344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Araujo, C. F., Nolasco, M. M., Ribeiro, A. M. P., & Ribeiro-Claro, P. J. A. (2018). Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research*, 142, 426–440. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.060>
- Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2014). Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions. *Environmental Pollution*, 185, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.007>
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of Controlled Release*, 235, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*, 368(6496), 1257–1260. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Cedervall, T., Lynch, I., Lindman, S., Berggård, T., Thulin, E., Nilsson, H., Dawson, K. A., & Linse, S. (2007). Understanding the nanoparticle–protein corona using methods to quantify exchange rates and affinities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(7), 2050–2055. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608582104>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Cowger, W., Booth, A. M., Hamilton, B. M., et al. (2020). Reporting guidelines to increase the reproducibility and comparability of research on microplastics. *Environmental Science & Technology*, 54(16), 10215–10223. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03368>

- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., et al. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Environmental Science & Technology*, 50(15), 8012–8020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00651>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. (2021). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA Journal*, 19(6), e06572. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6572>
- Fendall, L. S., & Sewell, M. A. (2009). Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1225–1228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>
- Fischer, M., & Scholz-Böttcher, B. M. (2017). Simultaneous identification of microplastics in environmental samples by pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry. *Analytical Methods*, 9, 5131–5141. <https://doi.org/10.1039/C7AY00600E>
- Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17, 1513–1521. <https://doi.org/10.1039/C5EM00207A>
- Gigault, J., Halle, A. T., Baudrimont, M., et al. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution*, 235, 1030–1034. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Groh, K. J., Backhaus, T., Carney-Almroth, B., et al. (2019). Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Environmental Sciences Europe*, 31, 55. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0210-8>

- Guo, X., & Wang, J. (2019). The chemical behaviors of microplastics in marine environment. *Science of the Total Environment*, 683, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.389>
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., et al. (2019). Microplastics as vectors for environmental contaminants. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05586>
- Hermesen, E., Mintenig, S. M., Besseling, E., & Koelmans, A. A. (2018). Quality criteria for the analysis of microplastic in biota samples. *Water Research*, 155, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Hussain, N., Jaitley, V., & Florence, A. T. (2021). Recent advances in nanoparticle toxicity. *Journal of Controlled Release*, 331, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.01.030>
- Jin, Y., Xia, J., Pan, Z., et al. (2019). Polystyrene microplastics induce microbiota dysbiosis and inflammation. *Environmental Pollution*, 249, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.012>
- Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermesen, E., et al. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water. *Water Research*, 155, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Koelmans, A. A., Redondo-Hasselerharm, P. E., Nor, N. H. M., et al. (2022). Risk assessment of microplastics. *Environment International*, 161, 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107099>
- Kutralam-Muniasamy, G., Shruti, V. C., & Pérez-Guevara, F. (2020). Microplastic contamination in food. *Science of the Total Environment*, 709, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136050>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., et al. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Lu, L., Wan, Z., Luo, T., et al. (2018). Microplastics induce gut microbiota dysbiosis. *Environmental Pollution*, 242, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.032>
- Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., et al. (2017). Health benefits of fermented foods. *Current Opinion in Biotechnology*, 44, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010>
- McClements, D. J. (2015). *Food emulsions: Principles, practices, and techniques* (3rd ed.). CRC Press.

- Monopoli, M. P., Åberg, C., Salvati, A., & Dawson, K. A. (2012). Biomolecular coronas provide the biological identity of nanosized materials. *Nature Nanotechnology*, 7(12), 779–786. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.207>
- Muncke, J. (2021). Exposure to endocrine disrupting chemicals from food packaging. *Environmental Science & Technology*, 55, 1400–1412. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07847>
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., et al. (2020). Environmental exposure to microplastics. *Science of the Total Environment*, 702, 134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
- Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T., & Kaye, S. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals. *Scientific Reports*, 3, 3263. <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- SAPEA. (2019). *A scientific perspective on microplastics in nature and society*. SAPEA.
- Senathirajah, K., et al. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested. *Environmental Pollution*, 272, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115132>
- Vethaak, A. D., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science*, 371(6530), 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
- Visentin, E., Manuelian, C. L., Niero, G., Benetti, F., Perini, A., Zanella, M., ... & De Marchi, M. (2024). Characterization of microplastics in skim-milk powders. *Journal of dairy science*, 107(8), 5393-5401.
- World Health Organization. (2019). *Microplastics in drinking water*. WHO.
- Yong, C. Q. Y., Valiyaveetil, S., & Tang, B. L. (2020). Toxicity of microplastics and nanoplastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1509. <https://doi.org/10.3390/ijms21041509>
- Visentin, E., Manuelian, C. L., Niero, G., Benetti, F., Perini, A., Zanella, M., ... & De Marchi, M. (2024). Characterization of microplastics in skim-milk powders. *Journal of dairy science*, 107(8), 5393-5401.



BÖLÜM 3

Postbiyotikler: Mikrobiyal Metabolitlerden Sağlık Destekleyici Bileşenlere

Muhammet Fatih İşleyen¹ & Nurdan Arslankoz İşleyen²

1. Giriş

Postbiyotikler; inaktive edilmiş mikroorganizmalar, bunların hücresel bileşenleri veya metabolitlerinden oluşan biyoaktif preparatlar olarak tanımlanmaktadır. Terim, Yunanca “post” (sonra) ve “bios” (yaşam) kelimelerinden türetilmiştir. Bu kavram ilk kez 2012 yılında İspanyol bilim insanı Kateryna Tsilingiri tarafından, probiyotik fermantasyon sırasında üretilen inaktive mikrobiyal hücreler ve bunların metabolit kompleksini tanımlamak amacıyla ortaya konmuştur(Xiao ve ark., 2025).

Hücre canlılığı, uzun yıllar boyunca bir probiyotiğin sağlık yararı sağlayabilmesi için temel bir kriter olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, yalnızca canlı mikroorganizmaların değil; canlı olmayan mikroorganizmalar, bunların hücresel bileşenleri ve metabolitlerinin de konak sağlığı üzerinde etkili olabileceği anlaşılmıştır. Literatürde bu tür preparatlar için “canlı olmayan probiyotikler”, “ısıl işlem ile inaktive edilmiş probiyotikler”, “tindalize probiyotikler”, “hücre lizati”, “paraprobiotikler”, “ghostbiyotikler” ve “postbiyotikler” gibi farklı terimler kullanılmaktadır. Bu kavramsal çeşitliliği gidermek amacıyla, 2021 yılının ortalarında Uluslararası Probiyotikler ve Prebiyotikler Bilimsel Derneği (ISAPP) tarafından postbiyotiklere ilişkin bir tanım önerilmiştir. Buna göre postbiyotikler, “konak üzerinde sağlık yararı sağlayan cansız mikroorganizmalar ve/veya bunların bileşenlerini içeren hazırlanmış ürünler” olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu tanım, farklı disiplinlerden bilim insanlarının yer aldığı bir uzlaş paneli tarafından bir yılı aşkın sürede yürütülen kapsamlı tartışmalar sonucunda oluşturulmuştur. Son yıllarda “postbiyotik” teriminin kullanımı belirgin şekilde artmış olsa da 2021 yılına kadar ortak bir uzlaş tanımının bulunmaması kavramsal karmaşaya yol açmıştır. ISAPP tarafından geliştirilen bu net ve özenle hazırlanmış tanım,

¹ Öğretim Görevlisi Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü ORCID ID: 0000-0002-1307-1495

² Dr. Öğretim Üyesi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü ORCID ID: 0000-0002-6098-3809

postbiyotiklere ilişkin iletişimde bilim insanları, endüstri ve düzenleyici otoriteler açısından daha açık ve tutarlı bir çerçeve sunmaktadır (Vinderola ve ark., 2022; Salminen ve ark., 2021).

Probiyotikler, uygun miktarlarda vücuda alındığında konağa sağlık yararı sağlayan canlı mikroorganizmalardır. Probiyotikler, fermente (yoğurt, peynir) veya fermente olmayan (tahıl veya çikolata barları, meyve suları, smoothie'ler) gıdalarda bulunabilir; bunlar süt kökenli veya bitkisel olabilir. Yoğurt, probiyotiklerin en yaygın kullanıldığı gıdadır. Ancak bazı gıda özellikleri (asitlik, su aktivitesi, belirli kimyasal bileşikler) veya depolama koşulları (nem, sıcaklık, oksijen geçirgenliği, süre) probiyotiklerin gıda içindeki canlılığını etkileyebilir. Bu bağlamda, bazı probiyotik suşların gıdalardaki yetersiz canlılığı sistematik olarak bildirilmiştir. Bu nedenle, cansız mikroorganizmalar da birçok gıda ürünüde bulunabilir (Vinderola ve ark., 2022)

Postbiotikler, yalnızca mikroorganizmaların inaktive edilmesi veya öldürülmesiyle elde edilen, sağlık yararı sağladığı kanıtlanmış ve tekrarlanabilir yöntemle hazırlanmış kültürlerdir. Ölü bir probiyotik, gıdada bulunsan bile doğrudan postbiyotik sayılmaz; postbiyotik olarak kabul edilmesi için sağlık yararı göstermesi gerekir.

Postbiyotik terimi; mikroorganizmalar artık canlılığını yitirdiğinde veya diğer bir deyişle cansız ya da inaktive hale geldiklerinde elde edilen, konakçıya sağlık yararı sağlayan preparatları ifade eder. Postbiyotiği oluşturan mikroorganizmalar, cansız, bütün hücreler olabileceği gibi hücre duvarları gibi mikroorganizmaların yapısal parçaları da olabilir. Postbiyotikleri oluşturan bileşenler; inaktive edilmiş bütün hücreler olabileceği gibi, hücre duvarı fraksiyonları gibi mikroorganizmalara ait yapısal bileşenleri de kapsayabilir. Birçok postbiyotik hazırlığı ayrıca metabolitler, proteinler veya peptitler gibi mikroorganizmalar tarafından üretilen maddeleri de içerir; bunlar postbiyotik tarafından sağlanan sağlık etkisine katkıda bulunabilir, ancak bu bileşenler postbiyotik için zorunlu değildir. Birçok postbiyotik preparatı; ayrıca metabolitler, proteinler veya peptitler gibi mikroorganizma kaynaklı ekstrasellüler bileşenleri de içerir; bunlar postbiyotiğin sergilediği sağlık etkisine katkıda bulunabilir, ancak bu bileşenlerin varlığı postbiyotik tanımı için elzem değildir. Bir postbiyotik, genomik dizileri bilinen iyi tanımlanmış bir mikroorganizma veya mikroorganizma kombinasyonundan türetilmeli, biyokütle üretimi ile inaktivasyonunu kapsayan belirlenmiş bir teknolojik süreçle hazırlanmalı ve güvenilir bir şekilde tekrarlanabilir olmalıdır (Vinderola ve ark., 2022). Postbiyotiklerin sağlık üzerindeki yararlı etkilerinin mekanizmaları henüz tam olarak açıklanamamış olsa da bilimsel veriler postbiyotiklerin antimikrobiyal, antioksidan ve immüno modülatör özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu özellikler mikrobiyota

homeostazını olumlu yönde etkileyebilir ve/veya konak metabolizması ile sinyal yollarını etkileyerek çeşitli fizyolojik, immünolojik, nöro-hormonal ve metabolik reaksiyonları düzenleyebilir (Aguilar ve ark 2018; Sharma ve Shukla, 2016; Shenderov, 2013).

Postbiyotiklerin modern biyoteknoloji ve gıda takviyesi dünyasında sunduğu en büyük avantajlardan biri, sahip oldukları doğal ve yüksek stablitedir. Canlı mikroorganizmaların aksine postbiyotikler, üretim süreçlerinden nihai tüketiciye ulaşana dek geçen uzun depolama periyotlarında yapısal bütünlüklerini korurlar. Bu yüksek stabilite, onları oksijen teması veya yüksek sıcaklık gibi çevresel faktörlere karşı son derece dirençli kılarak, soğuk zincir gereksinimini ortadan kaldırır. Bu durum, özellikle lojistik imkanların kısıtlı olduğu veya zorlu çevre koşullarına sahip bölgelerde ürünlerin güvenle taşınabilmesini ve oda sıcaklığında, hatta yıllarca, kalitesinden ödün vermeden saklanabilmesini sağlar. Üretim aşamasında ise canlı hücre kaybı gibi probiyotiklere özgü teknik zorlukları bertaraf eden postbiyotikler, içerik açısından sabit ve öngörülebilir bir form sunarlar. Raf ömrü boyunca etkinliğinin değişmemesi, bu bileşenlerin güvenlik değerlendirmelerini daha kontrollü ve şeffaf hale getirir. Sonuç olarak postbiyotikler, üretimden tüketime kadar geçen tüm süreçte hem üreticiye operasyonel kolaylık hem de tüketiciye her kullanımda aynı standartta fayda sağlayan, dayanıklı ve güvenilir bir çözüm ortağı olarak öne çıkmaktadır (Salminen ve ark., 2021).

Aşılar, büyük ölçüde saflaştırılmış bileşenler ve ürünler (örneğin proteinler, peptitler, ekzopolisakkaritler), kısa zincirli yağ asitleri, hücresel bileşen içermeyen filtratlar ve kimyasal olarak sentezlenmiş bileşikler) ile virüsler (bakteriyofajlar dahil) tek başlarına postbiyotik olarak kabul edilmez; ancak bazıları postbiyotik preparatların içinde bulunabilir. Bir preparatın postbiyotik sayılabilmesi için, inaktivasyon öncesindeki mikrobiyal kompozisyonun tanımlanmış olması gerekir. Bu nedenle, tanımlanmamış mikroorganizmalardan elde edilen preparatlar bu tanıma dahil değildir. Örneğin, birçok geleneksel fermente gıda tanımlanmamış, karışık kültürlerin etkisiyle üretilir ve bu tür ürünler postbiyotik hazırlanmasında kullanılamaz. Ancak tanımlanmış mikroorganizmalar kullanılarak üretilmiş fermente ürünlerden postbiyotik elde edilebilir (Salminen ve ark., 2021).

Postbiyotikler probiyotiklerden farklıdır; bir mikroorganizmanın canlı halde sergilediği sağlık yararının, inaktive formunda da eş değer düzeyde ortaya çıkacağı öngörülemez. Ayrıca bu yaklaşım, bilimsel gelişimi ve yeniliği de kısıtlayabilir. Böyle bir tanım benimsendiğinde, önce bir mikroorganizmanın probiyotik olduğunun kanıtlanması ya da sadece zaten probiyotik olarak bilinen mikroorganizmalarla çalışılması gerekir; ardından postbiyotik kriterlerinin

sağlanması beklenir. Aslında önemli olan, doğrudan postbiyotik kriterlerinin karşılanmasıdır. Bunun yanında, yalnızca probiyotiklerin ürettiği metabolitlere odaklanan tanımlar da sorunludur. Çünkü bu durumda, probiyotik bir mikroorganizmanın ürettiği bir metabolit postbiyotik kabul edilirken, kimyasal olarak aynı olan bir metabolit probiyotik olmayan bir mikroorganizma tarafından üretildiğinde postbiyotik sayılmaz; bu da bilimsel açıdan tutarsız bir durum yaratır (Vinderola ve ark., 2022).

Postbiyotikler, bazı fonksiyonel gıdalara probiyotik veya prebiyotiklerin yerine eklenebilir; çünkü taşıma ve depolama sırasında daha stabildirler. Bu durum fonksiyonel gıda pazarının genişlemesine katkı sağlayabilir. Ayrıca güçlü biyolojik aktiviteleri nedeniyle ilaç endüstrisinde de önemli bir potansiyel göstermektedirler. Bununla birlikte konak hastalıklarına yönelik müdahale stratejilerinin geliştirilmesi çoğu zaman hastalıkların ortaya çıkış mekanizmalarının ve etki yollarının tam olarak bilinmemesi nedeniyle sınırlıdır. Postbiyotiklerin hastalıkların önlenmesi veya tedavisindeki mekanizmalarının açıklanması, klinik uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır (Wei ve ark., 2024). Postbiyotikler; taşıma ve depolama süreçlerinde daha yüksek stabilite sergilemeleri nedeniyle bazı fonksiyonel gıdalarda probiyotik veya prebiyotiklere alternatif olarak tercih edilebilir; bu durum, fonksiyonel gıda pazarının genişlemesine katkı sağlayabilir. Ayrıca, sahip oldukları güçlü biyolojik aktiviteler sebebiyle farmasötik endüstrisinde de önemli bir potansiyel arz etmektedirler. Bununla birlikte, konak hastalıklarına yönelik müdahale stratejilerinin geliştirilmesi, çoğu zaman hastalıkların patogenezinin ve etki mekanizmalarının tam olarak aydınlatılamaması nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Postbiyotiklerin hastalık profilaksisi veya tedavisindeki etki yollarının açıklanması, klinik uygulamalar açısından kritik önem taşımaktadır."

Fermentasyon sırasında laktik asit bakterileri (LAB), glikoliz ve proteoliz gibi metabolik yollar aracılığıyla çeşitli biyoaktif küçük moleküllü maddeler üretir (Fu ve ark., 2025). Bu metabolitler, postbiyotiklerin temel fonksiyonel bileşenlerini oluşturur. Canlı bakteri preparatlarıyla karşılaştırıldığında, metabolit temelli postbiyotikler; yüksek stabilite, iyi tanımlanmış hedefler ve kontrol edilebilir dozaj gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, konakçının bağırsak ortamına (örneğin mide asidi ve safra asitleri) karşı dirençlidirler (Ruiz ve ark., 2013); bu sayede probiyotik etkilerini daha doğrudan gösterebilirler. Kimyasal yapılarına ve fonksiyonel özelliklerine göre LAB kaynaklı metabolit temelli postbiyotikler başlıca; organik asitler, antimikrobiyal peptitler, ekzopolisakkaritler (EPS), enzimler ve vitaminleri içerir (Xiao ve ark., 2025). Bu bileşenler, bağırsak mikrobiyotik dengesinin düzenlenmesinde, bağırsaklık

yanıtlarının güçlendirilmesinde ve besin öğelerinin emiliminin artırılmasında hayati roller üstlenir.

Postbiyotikler, yüksek stabiliteye sahip olmaları, güvenli kullanım profilleri ve etki mekanizmalarının net bir şekilde anlaşılabilmesi sayesinde hem fonksiyonel gıdalar hem de medikal beslenme alanında önemli bir potansiyel taşımaktadır. Canlı mikroorganizmalar içermemeleri, onları probiyotiklere kıyasla daha avantajlı hale getirir; çünkü bu durum depolama, raf ömrü ve kullanım sırasında ortaya çıkabilecek stabilite ve güvenlik sorunlarını büyük ölçüde ortadan kaldırır. Bu yönüyle postbiyotikler, özellikle hassas bireyler ve klinik uygulamalar için daha öngörülebilir ve kontrollü bir seçenek sunar. Mikroekoloji alanında giderek daha fazla ilgi gören bu bileşikler, bağırsak sağlığını destekleme, bağışıklık sistemini düzenleme ve patojen mikroorganizmaların gelişimini baskılama gibi çeşitli biyolojik etkilere sahiptir. Özellikle laktik asit bakterileri, güçlü asit üretme kapasiteleri ve zengin metabolit çeşitliliği sayesinde postbiyotik üretiminde öne çıkmaktadır. Bu bakterilerin oluşturduğu organik asitler, enzimler, peptitler ve diğer biyoaktif bileşenler, postbiyotiklerin fonksiyonel özelliklerini belirleyen temel unsurlar arasında yer alır. Bu nedenle postbiyotikler, hem gıda endüstrisinde hem de sağlık alanında gelecekte daha geniş kullanım alanı bulabilecek yenilikçi bileşenler olarak değerlendirilmektedir (Xiao ve ark., 2025).

Postbiyotikler, fonksiyonel gıdalar ve medikal beslenme alanında giderek daha fazla önem kazanan bileşenler arasında yer almakta olup, yüksek stabiliteleri, güçlü güvenlik profilleri ve iyi tanımlanmış etki mekanizmaları sayesinde dikkat çekmektedir (Yao ve ark., 2024). Bu bileşiklerin canlı mikroorganizma içermemesi, probiyotik kullanımında karşılaşılan stabilite ve güvenlik sorunlarını büyük ölçüde ortadan kaldırarak daha kontrollü ve öngörülebilir bir kullanım imkânı sunmaktadır (Wang ve ark., 2020). Mikroekoloji alanında gelişmekte olan bu yaklaşım, özellikle hassas gruplarda ve klinik uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır.

Postbiyotiklerin üretiminde kullanılan mikroorganizmalar da bu sürecin etkinliğinde belirleyici rol oynamaktadır. Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen (GRAS) mikroorganizmalar arasında yer alan laktik asit bakterileri (LAB), güçlü asit üretme kapasiteleri ve çeşitli metabolik yan ürünler oluşturabilmeleri sayesinde postbiyotik üretimi için oldukça uygun bir grup olarak öne çıkmaktadır (Kapustian ve ark., 2018). Bu bakteriler tarafından üretilen organik asitler, enzimler ve biyoaktif peptitler, postbiyotiklerin fonksiyonel özelliklerinin temelini oluşturmaktadır.

Öte yandan, postbiyotiklerin etkinliği yalnızca kullanılan mikroorganizmalara değil, aynı zamanda üretim süreçlerine de bağlıdır. Özellikle mikrobiyal

fermantasyon, bu bileşiklerin oluşumunda kritik bir rol oynamaktadır (Liu ve ark., 2023). Fermentasyon sürecinde kullanılan substratlar da büyük önem taşımakta olup, polisakkaritler ve proteinler açısından zengin tahıllar hem LAB gelişimini desteklemekte hem de çeşitli biyoaktif bileşiklerin üretimini artırmaktadır (Tufail ve ark., 2025). Bu süreçte LAB, makromolekülleri daha küçük ve biyoyararlanımı yüksek bileşenlere dönüştürerek kısa zincirli yağ asitleri ve antioksidan peptitler gibi fonksiyonel ürünlerin oluşumunu sağlar. Böylece hem üretim verimi artmakta hem de elde edilen postbiyotiklerin biyolojik aktivitesi güçlenmektedir (Xiao ve ark., 2025).

Mevcut birçok postbiyotik, günümüzde 31 cinsi kapsayan *Lactobacillaceae* ailesinin bazı cinslerine veya *Bifidobacterium* cinsine ait, daha önce probiyotik olarak kabul edilmiş taksonlara mensup cansız (inaktive edilmiş) suşları içermektedir. Bununla birlikte, bir mikrobiyal suşun veya suş konsorsiyumunun, inaktive edilmiş formunun postbiyotik olarak kabul edilebilmesi için canlı hâlinin probiyotik olarak sınıflandırılması zorunlu değildir (Aguilar ve ark 2019; Salminen ve ark., 2021).

Sağlık üzerinde etkili mikrobiyal ürünler değerlendirilirken iki farklı durumun birbirinden net olarak ayrılması gerekir. İlk grup, yapısı ve biyolojik etkileri açıkça tanımlanmış, belirli moleküllerden oluşan ve sağlık yararları bilimsel olarak kanıtlanmış bileşenleri içerir. İkinci grup ise mikrobiyal hücrelerden elde edilen, çok sayıda bileşen içeren ve içeriği tam olarak karakterize edilmemiş karmaşık karışımlardan oluşur. Bu iki grup arasındaki ayrımın doğru yapılması, bilimsel değerlendirmelerin güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Bir mikroorganizmanın postbiyotik üretiminde kullanılabilmesi için ise bazı temel kriterlerin karşılanması gerekir. Bunlar; mikroorganizmanın suş düzeyinde tanımlanmış olması, üretim sürecinin ayrıntılı olarak açıklanması ve elde edilen postbiyotik ürünün güvenilirlik ile etkinliğinin hedef konakta uygun bilimsel çalışmalarla gösterilmiş olmasıdır (Calvanese ve ark., 2025).

Mevcut literatür incelendiğinde, postbiyotiklerin genellikle *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* gibi geleneksel probiyotik bakterilerden elde edildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra, *Bacteroides* türleri, *Akkermansia muciniphila* gibi yeni nesil probiyotikler ve diğer bağırsak mikroorganizmaları da postbiyotik üretiminde kaynak olarak kullanılabilir (Wei ve ark., 2024).

Biyolojik aktivite açısından postbiyotikler; kısa zincirli yağ asitleri (asetat, propiyonat ve bütirat gibi), hücre yüzey proteinleri, ekzopolisakkaritler, antimikrobiyal peptitler ve diğer faydalı bileşenler bakımından zengindir. Etkilerini antiinflamatuvar, antioksidan, immünomodülatör ve metabolik düzenleyici mekanizmalar yoluyla gösterirler (Al-Habsi ve ark., 2024). Ayrıca postbiyotikler, antibiyotik direnç genlerinin transferi ve fırsatçı enfeksiyonlar

gibi canlı bakterilere bağı riskleri ortadan kaldırmaktadır. Bu durum, onları bebek mamaları, medikal besinler ve bağıışıklığı baskılanmış bireylere yönelik beslenme müdahalelerinde daha güvenli alternatifler haline getirmektedir. (Guglielmetti ve ark., 2025). Klinik çalışmaları, postbiyotiklerin yalnızca bağırsak mikrobiyota dengesini yeniden sağlamaya ve bağırsak bariyer fonksiyonunu güçlendirmeye yardımcı olmakla kalmadığını; aynı zamanda diyabet ve obezite gibi metabolik bozuklukların ve inflamatuvar bağırsak hastalığı gibi bağıışıklıkla ilişkili hastalıkların yönetiminde de umut verici olduğunu göstermiştir (Zhang ve ark., 2022).

Postbiyotikler, mikroekolojide gelişmekte olan önemli bir alan olarak, canlı olmayan yapıları sayesinde probiyotik kullanımına ilişkin stabilite ve güvenlik sorunlarını ortadan kaldırmakta ve yüksek stabiliteleri, güçlü güvenlik profilleri ile iyi tanımlanmış etki mekanizmaları sayesinde fonksiyonel gıdalar ve medikal beslenme alanında önemli bir potansiyel sunmaktadır (Wang D, C, ve ark., 2020; Yao ve ark., 2024). Bu bağlamda, (GRAS) mikroorganizmalar arasında yer alan laktik asit bakterileri, güçlü asit üretme kapasiteleri ve çeşitli metabolik yan ürünleri nedeniyle postbiyotik üretimi için özellikle uygun olup, kendilerine özgü metabolik özellikleri sayesinde diğer mikrobiyal kaynaklara kıyasla belirgin avantajlar sağlamaktadır (Kapustian ve ark., 2018; Arqu'es ve ark., 2015).

Nitekim LAB hücre duvarında bulunan peptidoglikanlar ve yüzey proteinleri güçlü immünomodülatör etkiler gösterirken, laktik asit ve bakteriyosinler gibi metabolik ürünler patojen bakterilerin gelişimini doğrudan inhibe edebilmektedir (Arqu'es ve ark., 2015). Postbiyotiklerin etkinliği büyük ölçüde üretim süreçlerine, özellikle de mikrobiyal fermantasyona bağı olup (D. Liu, Guo ve ark., 2023), bu noktada polisakkaritler ve proteinler bakımından zengin tahıl substratları hem LAB gelişimini desteklemekte hem de fermantasyon sürecinde çeşitli biyoaktif bileşiklerin oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Tufail ve ark., 2025). Fermantasyon sırasında LAB, makromoleküler bileşenleri kısa zincirli yağ asitleri ve antioksidan peptitler gibi daha yüksek biyoyararlanıma sahip aktif moleküllere dönüştürerek hem verimi hem de postbiyotiklerin fonksiyonel aktivitesini artırmaktadır (X. Li, Li ve ark., 2023). Bu nedenle LAB'ın tahıl matriksleriyle birleştirilmesi, sağık düzenleyici potansiyeli artırılmış yeni nesil fonksiyonel postbiyotik ürünlerin geliştirilmesinde yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Yaqoob ve ark., 2024). Tüm bu avantajlar ve tahıl fermantasyon sistemlerinde üretilebilme potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, LAB kaynaklı fonksiyonel bileşenler üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerekmekte olup, fermantasyon sürecinde oluşan postbiyotiklerin metabolit temelli ve hücresele bileşen temelli olmak üzere iki ana grupta incelendiğı bildirilmektedir (Moradi ve ark., 2021).

Postbiyotikler, yüksek stabiliteleri, güçlü güvenlik profilleri ve iyi tanımlanmış etki mekanizmaları sayesinde fonksiyonel gıdalar ve medikal beslenme alanında önemli bir potansiyele sahiptir. (GRAS) mikroorganizmalar arasında yer alan laktik asit bakterileri, güçlü asit üretme kapasiteleri ve çeşitli metabolik yan ürünleri nedeniyle postbiyotik üretimi için özellikle uygundur (Yao ve ark., 2024; Xiao ve ark., 2025). LAB kaynaklı postbiyotikler, LAB'ın özgün metabolik özellikleri sayesinde diğer mikrobiyal kaynaklardan elde edilen postbiyotiklere göre belirgin avantajlara sahiptir. Örneğin, LAB hücre duvarında bulunan peptidoglikanlar ve yüzey proteinleri güçlü immünomodülatör etkilere sahiptir; ayrıca organik asitler (örneğin laktik asit) ve antimikrobiyal peptitler (örneğin bakteriyosinler) gibi metabolik ürünleri patojen bakterilerin gelişimini doğrudan inhibe edebilir (Arqu'es ve ark., 2015).

Postbiyotikler, stabilize, güvenlik ve uygulama alanı açısından geleneksel probiyotiklere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Canlı bakteri içermedikleri için soğuk zincir depolama gerektirmezler ve oda koşullarında (genellikle 15-30 °C) aktivitelerini koruyabilirler; bu da taşıma ve depolama maliyetlerini önemli ölçüde azaltır (Sheikhi ve ark., 2025). Probiyotiklerin; enfeksiyonlara yol açma, zararlı maddeler üretme ve antibiyotik direnç genlerini bağırsaktaki diğer mikroorganizmalara aktarma gibi olası olumsuz etkileri konusunda bazı endişeler bulunmaktadır. Bu nedenle, özellikle bağışıklık sistemi zayıf olan veya bağırsak mukozal bariyeri bozulmuş kişiler için postbiyotikler daha güvenli ve uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Zhao ve ark., 2024).

Postbiyotikler özellikle soğuk zincir altyapısının sınırlı olduğu bölgeler için büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bileşimleri ve dozajları raf ömrü boyunca stabildir; böylece sıcaklık, oksijen ve pH gibi çevresel faktörlere bağlı olarak canlı probiyotiklerde görülen aktivite dalgalanmaları önlenmiş olur (Blazheva ve ark., 2022). Postbiyotikler canlı mikroorganizma içermediği için canlılık sorunu yoktur. Bu sayede daha stabil ve güvenlidirler. Gıda ve yemlere kolayca eklenebilirler ve son ürünün raf ömrü stabilitesine katkıda bulunurlar.. Diğer biyotiklerle karşılaştırıldığında, postbiyotiklerin raf ömrü daha uzundur; ayrıca taşınması, depolanması ve kullanımı daha kolaydır. Ayrıca postbiyotiklerin; patojenlerin inhibisyonu, obezitenin kontrolü ve glukoz homeostazının sürdürülmesi gibi fonksiyonel özelliklere sahip olduğu da öne sürülmektedir. Bu nedenle postbiyotikler, hem insan hem de hayvan sağlığını desteklemek için güvenli ve etkili bir seçenek olarak büyük potansiyele sahiptir (Asif ve ark., 2023; Ma ve ark., 2023; Wei ve ark., 2024; Ikram ve ark 2024).

Bir preparatın postbiyotik olarak nitelendirilebilmesi için karşılanması gereken kriterler şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak, progenitör mikroorganizmaların doğru biçimde tanımlanabilmesi ve güvenlik açısından

endişe yaratabilecek potansiyel genlerin taranabilmesi amacıyla moleküler karakterizasyonun örneğin tam açıklamalı bir genom dizisinin yapılmış olması gerekmektedir. İkinci olarak, inaktivasyon prosedürü ve kullanılan matriks ayrıntılı biçimde tanımlanmalıdır. Buna ek olarak, inaktivasyonun gerçekten gerçekleştiği doğrulanmalıdır. Sağlık yararı açısından ise kontrollü ve yüksek kaliteli bir klinik çalışma aracılığıyla konakçıda sağlık yararı sağlandığına dair kanıt sunulmalıdır. Bunun yanı sıra postbiyotik preparatın bileşimi ayrıntılı olarak açıklanmalıdır. Son olarak, preparatın hedef konakçıda amaçlanan kullanım kapsamında güvenlik değerlendirmesi yapılmış olmalıdır (Salminen ve ark., 2021).

Teknik açıdan bakıldığında, Probiyotiklerin suş düzeyinde tanımlanmış olması, preparat yönteminin yeterince açıklanmış bulunması ve preparatın güvenilirlik ile etkinliğinin hedeflenen konakta usulüne uygun yürütülen çalışmalarla kanıtlanmış olması koşuluyla, herhangi bir mikroorganizma postbiyotik üretiminde kullanılabilir Mevcut literatüre göre postbiyotikler başta *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* cinslerindeki suşlar gibi geleneksel probiyotiklerden ya da *Bacteroides* spp., *Akkermansia muciniphila* ve diğer bağırsak mikroorganizmaları gibi yeni nesil probiyotiklerden elde edilmektedir. Postbiyotiklerin vücutta nasıl etki gösterdiğine dair beş temel mekanizma önerilmektedir: i) Bağırsak mikrobiyotasının düzenlenmesi: Postbiyotikler; laktik asit, kısa zincirli yağ asitleri, bakteriyosinler gibi maddeler aracılığıyla bağırsakta yaşayan faydalı bakteri topluluğunun dengesini olumlu yönde etkileyebilir; ii) Bağırsak bariyerinin güçlendirilmesi: Ekzopolisakkaritler, kısa zincirli yağ asitleri ve proteinler gibi bileşenler sayesinde bağırsak duvarının geçirgenliği azaltılarak dış tehditlere karşı koruyucu işlev artırılabilir; iii) Bağışıklık sisteminin modülasyonu: Postbiyotikler, bağışıklık hücreleriyle etkileşime girerek hem bağırsakta hem de tüm vücutta bağışıklık yanıtlarını düzenleyebilir. Bu etki; indol türevleri, keto asitler ve dallanmış zincirli yağ asitleri gibi moleküller üzerinden gerçekleşir; iv) Metabolik süreçlerin düzenlenmesi: Safra tuzu hidrolaz, süksinat, vitaminler ve kısa zincirli yağ asitleri gibi bileşenler aracılığıyla vücudun genel metabolik işleyişi olumlu yönde etkilenebilir; v) Sinir sistemi üzerinden sinyal iletimi: Postbiyotikler; serotonin, dopamin, asetilkolin ve gama-aminobütirik asit gibi nörotransmitterler aracılığıyla beyin-bağırsak eksenini etkileyerek sinir sistemi üzerinde de etki gösterebilir (Calvanese ve ark., 2025).

Laktik asit bakterilerinin sağlık açısından faydalı birçok metabolit üretebildiği bilinmektedir. Bunlar arasında ekzopolisakkaritler, fruktooligosakkaritler, kısa zincirli yağ asitleri (SCFA), konjuge linoleik asitler, bakteriyosinler ve selenoproteinler bulunmaktadır. Bu metabolitlerin antioksidan özellikler,

başıklık düzenleyici etkiler ve epitel bariyer fonksiyonunun güçlendirilmesi gibi umut verici sağlık yararları gösterdiği ortaya konmuştur. Bu nedenle LAB, en yaygın kullanılan probiyotikler ve postbiyotik üretimi için başlangıç materyalleridir. *Lactobacillus*, en az 60 türü kapsayan büyük bir bakteri cinsidir. Bu bakteriler LAB grubunun bir parçasıdır ve insan gastrointestinal sisteminde küçük miktarlarda bulunurlar. *Lactobacillus*'ler yüzyıllardır gıda üretiminde kullanılmaktadır ve birçok ticari probiyotik ve postbiyotik ürün şu türlerden elde edilmektedir: *L. acidophilus*, *L. gasseri*, *L. casei*, *L. paracasei*, *L. helveticus*, *L. rhamnosus*, *L. bulgaricus*, *L. reuteri*, *L. pentosus*, *L. plantarum* ve *L. zeae*. Örneğin *L. paracasei*'den elde edilen lipolitik bir postbiyotik, sıçan modelinde metabolik sendromun tedavisinde etkili olma potansiyeli göstermiştir (Osman ve ark., 2021; Zhao ve ark., 2024).

Lactococcus, özellikle süt endüstrisinde fermentasyonda yaygın olarak kullanılan başka bir bakteri cinsidir. Bu bakteriler küresel veya oval şekillidir ve fakültatif anaerob oldukları için hem oksijen varlığında hem de yokluğunda yaşayabilirler. Yaygın olarak kullanılan bir tür olan *Lactococcus lactis*, in vitro çalışmalarda postbiyotik özellikleri açısından incelenmiş ve başlık hücrelerini sitokin üretmeye teşvik ettiği gösterilmiştir; bu durum, sistemik sağlık üzerinde potansiyel faydalar barındırmaktadır.". *Pediococcus* türleri, özellikle *P. pentosaceus* ve *P. acidilactici*, son zamanlarda probiyotik olarak popülerlik kazanmıştır. Bu bakteriler, bakteriyostatik ve antifungal özelliklere sahip olup patojen mikroorganizmalara karşı etkili antagonistik aktivite gösteren bakteriyosinler ve çeşitli antimikrobiyal metabolitler üretebilmektedir. Ayrıca, *Pediococcus acidilactici*'den elde edilen bakteriyel lizat formundaki bir postbiyotiğin, 3T3-L1 hücrelerinde yağ hücresi oluşumu (adipogenez) ile ilişkili süreçleri baskılayarak anti-adipogenik etki gösterdiği belirlenmiştir. *Leuconostoc* türleri ise işlenmiş et ve süt ürünleri başta olmak üzere birçok ticari gıda üretiminde ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Bazı türleri gıda bozulmasına neden olabilse de, genel olarak insan tüketimi açısından güvenli kabul edilmektedir. Fonksiyonel gıda endüstrisinde *Leuconostoc*, probiyotik mikroorganizmaların bağırsakta tutunmasını desteklemek ve özellikle çocuklar tarafından tüketilen fermente süt ürünlerinin bağırsakta kalış süresini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, *Leuconostoc* tarafından üretilen metabolitlerin mantar kaynaklı enfeksiyonların kontrolünde postbiyotik olarak değerlendirilme potansiyeline sahip olduğu bildirilmektedir (Zhao ve ark., 2024).

Streptococcus türleri, *S. salivarius*, *S. vestibular* ve *S. thermophilus* gibi türleri içerir ve pnömoni, orta kulak iltihabı (otitis media) ve sinüzit gibi çeşitli hastalıklara neden olabilir. *S. thermophilus*, süt endüstrisinde başlatıcı kültür

olarak önemli bir rol oynar ve özellikle yoğurt ile çeşitli peynirlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca *Clostridium tyrobutyricum*, *Clostridium sporogenes*, *Clostridium botulinum*, *Bacillus cereus* ve *Listeria monocytogenes* gibi bazı bakterilerin büyümesini etkili biçimde engelleyen bakteriyosinler üretir. Bir probiyotik olarak *S. thermophilus*, çocuklarda bağırsak kaynaklı ishallere, yenidoğanlarda inflamatuvar bağırsak hastalıkları ve ağız sağlığı üzerinde olumlu etkiler göstermektedir; tek başına ya da diğer probiyotiklerle birlikte kullanılabilir. Ayrıca *S. pneumoniae*, *S. pyogenes* ve *S. mitis* gibi çeşitli bakterilerden elde edilen liyofilize edilmiş bakteri parçaları veya lizatlardan oluşan postbiyotiklerin, solunum yolu hastalıklarının tedavisinde umut verici sonuçlar gösterdiği ve klinik uygulamalar için önemli potansiyel taşıdığı bildirilmektedir (Hols ve ark., 2005; Delorme 2008; Zago' lski ve ark., 2015).

Enterococcus ve *Streptococcus* cinsleri; bünyesinde insanlarda patojenite sergilediği bilinen türleri barındırmaktadır.. İnsan ve hayvanlarda gastrointestinal sistemde baskın mikroorganizmalardan biri olan *Enterococcus*; et ürünlerinde bozulma etmeni olarak işlev görürken, çeşitli peynirlerin olgunlaşma sürecinde karakteristik organoleptik (duyusal) özelliklerin gelişimine katkıda bulunmaktadır. Gıda kaynaklarından izole edilen *E. faecium* gibi bazı *Enterococcus* suşları, bakteriyosin üretimi gibi biyoteknolojik özelliklere sahip olup fermente gıda endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılmaya uygundur. Ancak, hayvansal üretimde antibiyotiklerin yem katkı maddesi olarak kullanılması; gıda zinciri üzerinden antibiyotik direnç unsurlarının yayılımına ve insan intestinal mikrobiyotasına ulaşarak bu özelliklerin patojen taksonlara yatay transferine sebebiyet vermiştir. İlginç bir şekilde, vankomisine dirençli *E. faecalis* suşlarının, bağırsaktaki vankomisine dirençli *Enterococcus* popülasyonunun kolonizasyonunu rekabetçi olarak inhibe etmek amacıyla postbiyotik formunda kullanılma potansiyeli bulunmaktadır." Ancak hayvan yemlerine katkı maddesi olarak antibiyotik kullanımı, gıda zinciri aracılığıyla antibiyotik direncinin yayılmasına ve insan bağırsaklarına ulaşmasına yol açmış, böylece bu özelliklerin patojen türlere aktarılmasına neden olmuştur. Vankomisine dirençli *E. faecalis*, bağırsakta vankomisine dirençli *Enterococcus* türlerinin kolonizasyonunu kontrol etmek amacıyla postbiyotik olarak kullanılma potansiyeline sahiptir Vankomisine dirençli *E. faecalis* suşları; bağırsaktaki vankomisine dirençli diğer *Enterococcus* türlerinin kolonizasyonunu kontrol altına almak ve bu patojenik popülasyonu baskılamak amacıyla bir postbiyotik stratejisi olarak kullanılma potansiyeline sahiptir (Giraffa ve ark., 1997; Giraffa 2002; Siragusa ve ark., 1992; Sakai ve ark 2006., Zhao ve ark., 2024).

Heterojen bir bileşen karışımı olabilen bir postbiyotiğin, hedef konakta sağlık etkisi yaratma kapasitesi, birçok farklı mekanizma tarafından belirlenebilir. Bazı

durumlarda bu mekanizmalar, probiyotiklerde bilinen mekanizmalara benzer şekilde işleyebilir. Bu mekanizmalar, bağımsız olarak veya birlikte hareket edebilir. Faydaların ortaya çıkmasında rol oynayan başlıca efektör moleküllerin anlaşılması, ticari bir postbiyotik ürünün etkinliğini koruması açısından kritik öneme sahiptir. Postbiyotikler cansız oldukları için, bu biyoaktif moleküller, inaktive edilmeden önce mikroorganizmalar tarafından yeterli miktarda üretilmiş olmalıdır (Salminen ve ark., 2021).

Tablo1: Probiyotik ve Postbiyotik Karşılaştırması

Kriter	Probiyotik	Postbiyotik
Etki Mekanizması	Kolonizasyon ve in situ aktivite	Biyoaktif bileşenler
Stabilite (Raf ömrü)	Kısa raf ömrü; depolama ve taşımaya duyarlı	Uzun raf ömrü; depolama ve taşıma koşulları daha kolay
Güvenlik	ARG aktarımı riski; bağışıklığı zayıf bireylerde enfeksiyon olasılığı	Enfeksiyon ve ARG aktarımı riski yok; hassas hastalarda daha güvenli
Uygulama Alanları	Bağırsak sağlığı ve bağışıklık sistemini destekleme	Nütrasötik ve ilaç sektörü; probiyotiklerin sorunlu olduğu durumlar
Sınırlılıklar	Güvenlik ve hayatta kalabilme sorunları	Uzun vadeli etkiler henüz bilinmiyor

Kaynak: (Calvanese ve ark., 2025).

Postbiyotiklerin gıda ve ilaç alanlarında etkin şekilde kullanılabilmesi için kimyasal içeriklerinin ayrıntılı biçimde ortaya konması gereklidir. Bu bileşikler, farklı bağ tipleri ve polimerizasyon derecelerine sahip kompleks yapılardan oluşur. Bu nedenle hem niteliksel hem de niceliksel olarak tanımlanmaları, ileri düzey analiz yöntemlerini zorunlu kılar. Bu amaçla çeşitli enstrümantal teknikler ve yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmiş olup, kullanılacak yöntem genellikle analiz hedefi ve yapılacak karakterizasyonun türüne göre belirlenir. Gaz kromatografisi (GC), sıvı kromatografisi (LC), ince tabaka kromatografisi (TLC), spektrofotometrik analizler, nükleer manyetik rezonans (NMR) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi gibi teknikler, postbiyotiklerin kimyasal yapısını incelemede yaygın olarak tercih edilmektedir (İçier, S. ve ark., 2022).

Postbiyotiklerin üretimi ve tanımlanmasında teknolojik faktörler büyük önem taşır. Öncelikle, üretimde kullanılan mikroorganizmaların doğru şekilde belirlenmesi gerekir. Ayrıca uygulanan inaktivasyon yöntemi de ayrıntılı olarak açıklanmalıdır, çünkü her yöntem farklı bir postbiyotik bileşimi ve etki ortaya

ıkarabilir. Bunun yanında, elde edilen son ürünün içeriğinin belirlenmesi ve miktarlarının ölçülmesi de önemli bir aşamadır. Postbiyotikler zaten cansız yapılar olarak tanımlanır. Ancak retim sırasında mikroorganizmalar kendiliğinden tamamen yok olmazsa, ayrıca bir inaktivasyon işlemi uygulanması gerekir. Postbiyotikler, doğaları gereğ i inaktive yapılar olarak tanımlanmaktadır. Ancak retim prosesi sonunda mikroorganizmaların tamamen canlılığını yitirmediğ i durumlarda, ürün stabilitesini ve güvenliğini sağlamak amacıyla ilave bir inaktivasyon prosedürü uygulanması elzemdir. rneğ in, oksijensiz ortamda yaşayan bazı mikroorganizmalar hava ile temas ettiğ inde zaten yaşamını sürdüremez. Mikroorganizmaları etkisiz hale getirmek için farklı yöntemler kullanılabilir; burada bazıları belirtilmiş olsa da, tüm yöntemleri kapsayan bir liste değildir (Salminen ve ark., 2021).

Mikroorganizmaların inaktivasyonunda çoğ u zaman ısıl işlemin kullanılması beklenmektedir; zira gıda endüstrisinde ısıl işlemin köklü bir geçmiş i bulunmaktadır. Gıda endüstrisinde köklü bir geçmiş i bulunan ısıl işlem mikroorganizmaların inaktivasyonunda çoğ u zaman öncelikli olarak tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Pastörizasyon, tindalizasyon ve otoklavlama gibi geleneksel ısıl işlem yöntemleri, gıda sistemlerine enzimatik ve mikrobiyolojik stabilite kazandırmak amacıyla yaygın biçimde uygulanmaktadır. Bununla birlikte, ısıtma sıcaklığ ı ve süresi; besin değerini, duysal özellikleri ve aromayı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, gıda takviyesi veya gıda maddesi olarak kullanılmak üzere tasarlanan bir postbiyotik preparatın üretiminde ısıl işlem her zaman en uygun yöntem olmayabilir. Termal sterilizasyon veya pastörizasyona kullanışlı alternatifler sunan başka işleme teknolojileri de mevcuttur. Gıdalarda mikroorganizmaların ısıl olmayan yöntemlerle inaktivasyonuna ilişkin teknolojik bilginin büyük bölümü, gıda kaynaklı patojen ya da bozulma etkenlerinin inaktivasyonu amacıyla geliştirilmiştir; ancak bu teknolojiler postbiyotik üretiminde de eşit etkinlikte kullanılabilir. Gıdalarda mikroorganizmaların termal olmayan yöntemlerle inaktivasyonuna ilişkin teknolojik literatürün büyük bölümü, gıda kaynaklı patojenlerin veya bozulma etmenlerinin eliminasyonu amacıyla geliştirilmiştir; bununla birlikte bu teknolojiler, postbiyotik üretiminde de benzer bir verimlilikle uygulanabilir. Isıl olmayan inaktivasyon teknikleri; gıdaların taze ürünlere yakın duysal özelliklerini koruyarak genel kalite ve değerden ödün vermeksizin güvenli ve stabil bir şekilde elde edilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu bağlamda, elektrik alan, ultrasonikasyon, yüksek basınç, X-ışınları, iyonlaştırıcı radyasyon, yüksek voltajlı elektrik deşarj ı, darbeleri ışık, manyetik alan ısıtması, orta düzey manyetik alan ve plazma teknolojisi gibi yöntemlerin mikroorganizmaların inaktivasyonunda ve postbiyotik üretiminde potansiyel olarak uygulanabileceğ i

değerlendirilmektedir (Barba ve ark 2017; Yıkılmış, 2016; Charoux 2020; Salminen ve ark., 2021).

Kimyasal yapı ve fonksiyonel özelliklerine dayanarak, LAB kaynaklı metabolit temelli postbiyotikler sistematik olarak birkaç temel gruba ayrılabilir (Şekil 1’de gösterildiği gibi). Bunlar başlıca antimikrobiyal peptitler, organik asitler, ekzopolisakkaritler (EPS), enzimler ve vitaminlerdir. LAB tarafından sentezlenen antimikrobiyal peptitler, postbiyotiklerin önemli savunma bileşenleri arasında yer alır. Ribozomal olarak üretilen bu bileşikler; bakteriyosinler ve çeşitli antimikrobiyal proteinleri kapsar ve küçük molekül ağırlıklı peptitlerden daha büyük protein yapısına kadar farklı boyutlarda olabilir. Yapılarına ve etki mekanizmalarına göre bu peptitler dört ana sınıfa ayrılır: modifiye lantibiyotikler, ısıya dayanıklı modifiye edilmemiş peptitler, ısıya duyarlı büyük proteinler ve siklik peptitler. Bu bileşikler, bakteri hücre duvarı sentezini bozarak, hücre zarının bütünlüğünü zedeleyerek veya temel metabolik yolları engelleyerek antimikrobiyal etki gösterir. Etki alanları bazı durumlarda oldukça spesifik olurken, bazı peptitler daha geniş bir mikroorganizma grubuna karşı da etkili olabilir. Bununla birlikte, pH ve sıcaklık değişimlerine karşı hassas olmaları kullanım alanlarını sınırlayabilir ve üretim miktarı ile etkinlik düzeyi kullanılan bakteri suşuna bağlı olarak değişir. Günümüzde genetik düzenleme teknikleri ve fermentasyon süreçlerinin optimize edilmesi sayesinde belirli antimikrobiyal peptitlerin daha kontrollü ve hedefe yönelik üretimi mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeler, özellikle gıda koruma ve sağlık alanlarında yeni biyokoruyucuların ve antimikrobiyal ajanların geliştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır (Tang ve ark., 2022; Ray ve ark., 2024; Lei ve ark., 2019; Chung ve ark., 2020; Lai ve ark., 2022; Ullah ve ark., 2025; Wibowo ve Zhao, 2019; Elshobary ve ark., 2020).

LAB metabolizması sonucunda oluşan organik asitler, postbiyotiklerin en önemli fonksiyonel bileşenlerinden biridir ve bu asitlerin yapısı ile etkileri büyük ölçüde kullanılan bakteri suşuna bağlıdır. Fermentasyon yollarına göre laktik asit bakterileri iki gruba ayrılır: homofermentatif suşlar ağırlıklı olarak laktik asit üretirken, heterofermentatif suşlar laktik aside ek olarak asetik asit ve etanol gibi farklı metabolitler de oluşturur. Üretilen organik asitlerin izomerik formları da önemlidir; örneğin L-laktik asit insan vücudu tarafından daha kolay kullanılırken, asetik asit daha güçlü antimikrobiyal etki gösterebilir. Bu organik asitler; ortamın pH’sını düşürerek patojen mikroorganizmaların gelişimini baskılar, hücre yüzeyindeki reseptörleri etkileyerek bağışıklık ve metabolik süreçlerin düzenlenmesine katkı sağlar ve özellikle kısa zincirli yağ asitleri bağırsak epitel hücreleri için enerji kaynağı olarak bağırsak bariyerinin korunmasında önemli rol oynar. Ayrıca yapılan çalışmalar, organik asit üretiminin bakteri türüne ve kültür koşullarına bağlı olarak değiştiğini ve bu sayede hedefe yönelik postbiyotik

üretiminin mümkün olduğunu göstermektedir. Analitik yöntemlerdeki farklılıklar (örneğin HPLC koşulları) sonuçların karşılaştırılmasını etkileyebileceğinden dikkatli değerlendirme gereklidir. Günümüzde metabolik mühendislik ve fermantasyon optimizasyonu sayesinde belirli organik asitlerin üretimi artırılabilir ve bu durum, bağırsak sağlığının desteklenmesi ve metabolik hastalıkların yönetimi açısından postbiyotiklerin kullanım potansiyelini daha da genişletmektedir (Xiao ve ark. 2025; Ramirez-Hernandez ve ark., 2018; Mimitsuka ve ark., 2015; Zalan ve ark., 2010).

Ekzopolisakkaritler (EPS), laktik asit bakterileri tarafından üretilen ve yapısal özellikleri ile fonksiyonel etkileri arasında güçlü bir ilişki bulunan önemli postbiyotik bileşenlerdir. Bu bileşikler sentez ve salgılanma şekillerine göre iki gruba ayrılır: hücre yüzeyine bağlı kapsüler polisakkaritler ve ortamda çözünebilen salgılanmış EPS'ler. Farklı molekül ağırlıklarına sahip olan bu polimerler, hücre zarına bağlı enzim sistemleri aracılığıyla üretilir. Yapılarında bulunan şeker türleri ve bunların bağlanma şekilleri hem fiziksel özelliklerini hem de biyolojik etkilerini belirler (Mishra ve Jha, 2013).

EPS'lerin etkileri üç temel düzeyde incelenebilir. Fiziksel olarak gıdalarda kıvam ve stabiliteyi artırarak tekstürün iyileşmesine katkı sağlarlar. Biyolojik açıdan bağışıklık sistemini etkileyerek bazı hücresel yanıtların düzenlenmesine yardımcı olurlar. Ayrıca patojen mikroorganizmaların yüzeylere tutunmasını zorlaştırarak dolaylı bir koruyucu etki de gösterebilirler. EPS üretimi kullanılan bakteri suşuna ve ortamda bulunan besin kaynaklarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle günümüzde fermantasyon koşullarının ayarlanması ve genetik çalışmalar sayesinde daha verimli ve hedefe yönelik EPS üretimi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır (Xiao ve ark. 2025).

LAB metabolizması sonucunda oluşan enzimler ve vitaminler de postbiyotiklerin önemli besinsel ve işlevsel bileşenleri arasında yer alır. Bu enzimler, gıdaların sindirilebilirliğini artırarak besin değerini yükseltir. Örneğin bazı enzimler antinutrisyonel bileşenleri parçalayabilir, bazıları ise protein yapısını değiştirerek gıdanın dokusunu iyileştirir veya laktoz sindirimini kolaylaştırır. Bunun yanında bazı laktik asit bakterileri, özellikle B grubu vitaminlerini sentezleyerek besinlerin besleyici değerine katkıda bulunur (Hassan ve ark., 2025). Mikrobiyal kaynaklı bu vitaminler genellikle daha iyi emilebilir özellik gösterir. Günümüzde metabolik mühendislik uygulamaları sayesinde hem enzim hem de vitamin üretimi daha kontrollü ve verimli hale getirilerek, bu bileşenlerin gıda ve sağlık alanındaki kullanım potansiyeli artırılmaktadır (Capozzi ve ark., 2012).

2. Postbiyotik Üretimi

Postbiyotiklerin üretiminde yer alan temel süreçler; inokülasyon (aşılama), fermentasyon, ve mikroorganizmaların inaktivasyonu işlemlerini içerir. Postbiyotikler; süt ürünleri (yoğurt, yayık ayranı/buttermilk, kefir, peynir), kombuça, kimchi, lahana turşusu ve diğer turşular dahil olmak üzere çeşitli fermente gıda ürünlerinde doğal olarak bulunabilir. Bunlar temel olarak *Lactobacillus* spp., *Streptococcus* spp., *Bifidobacterium* spp., *Faecalibacterium* spp. ve *Saccharomyces* spp. türlerine ait çeşitli faydalı mikroorganizmaların faaliyetleri ile üretilirler. Bu ürünler doğal fermentasyon içerdiğinden, postbiyotik bileşikler nispeten daha az miktarlarda üretilir (Garg ve ark., 2026).

Fermentasyon, genel olarak postbiyotik bileşiklerin doğal yolla üretilmesi için en yaygın teknik olarak kabul edilir. Substrat, probiyotik mikroorganizmalarla (veya diğer uygun starter kültürlerle) inoküle edilir (aşılır) ve daha sonra bunların uygun koşullar altında büyümesine izin verilir. Süreç temel olarak, substrat ortamında bulunan prebiyotiklerin (ve diğer besin maddelerinin) çok çeşitli biyoaktif metabolitler üretmek üzere mikroorganizmalar tarafından kullanılmasını içerir. Postbiyotik karışımının miktarı, mikroorganizmanın türüne ve ortamın bileşimine bağlıdır. Probiyotik ürünlerin sağlık üzerindeki faydaları, canlı ve ölü mikroorganizmaların birleşik bir etkisidir (Yadav ve ark., 2023; Sabahi ve ark., 2022).

Postbiyotik eldesindeki fermentasyon aşamasında, temel besiyeri olarak çoğunlukla süt ve bitki türevli hammaddeler tercih edilmektedir. Ancak üretimde yüksek bir verimlilik yakalayabilmek, kullanılan kaynağın kalitesine ve ortam koşullarının kusursuz olmasına bağlıdır. Bu doğrultuda, elde edilecek postbiyotik miktarını maksimize etmek amacıyla bu hammaddeler; dirençli nişasta, diyet lifleri, frukto-oligosakkarit ve galakto-oligosakkarit formundaki prebiyotiklerle zenginleştirilebilmektedir. Bu sürece saf prebiyotiklerin dahil edilmesi üretim masraflarını doğrudan yükselttiği için, günümüzde hem maliyet yükünü hafifletecek hem de atıkların yarattığı çevresel tahribatı azaltacak tarımsal yan ürünlerin kullanımına yönelik çalışmalara ağırlık verilmiştir. Peynir imalatı sırasında yüksek hacimlerde ortaya çıkan peynir altı suyu bu geri dönüşüme en iyi örneklerden biridir; zira yapısında barındırdığı yüksek orandaki laktoz, mineral ve protein sayesinde postbiyotik üretimi için hem sürdürülebilir hem de son derece elverişli bir zemin sunmaktadır. Peynir üretimi esnasında yüksek hacimlerde açığa çıkan peynir altı suyu (PAS), ileri dönüşüm stratejilerinin en somut örneklerinden birini teşkil etmektedir; zira ihtiva ettiği zengin laktoz, mineral ve protein fraksiyonları sayesinde postbiyotik üretimi için hem sürdürülebilir hem de son derece elverişli bir fermentasyon substratı sunmaktadır (Vera-Santander ve ark., 2024; Tong ve ark., 2023; Garg ve ark., 2026).

Postbiyotiklerin ayrı ayrı üretimi, ekstraksiyonu ve saflaştırılması masraflı olabilir ve maliyet açısından uygun olmayabilir. Sonuç olarak, biyoaktif metabolitler üretmek için düşük maliyetli besin ortamlarının (besiyerlerinin) kullanılması hem seri üretim hem de bireysel üretim için makul bir seçenektir (Amiri ve ark., 2021; Akhavan ve ark., 2026).

Postbiyotiklerin gıda matrisleriyle olan etkileşimleri, onların stabilitesini ve biyoaktivitesini büyük ölçüde etkiler. Hem protein ve lipit içeriği gibi içsel faktörler hem de pH, su aktivitesi ve işleme sıcaklığı gibi dışsal parametreler, postbiyotik bileşiklerin işlevsel performansını etkileyebilir. Yapılan çalışmalar, belirli postbiyotiklerin geniş bir pH değerleri ve termal koşullar yelpazesinde antimikrobiyal veya biyofonksiyonel aktivitelerini koruduğunu göstermiştir. Buna karşılık, belirli gıda bileşenleriyle girilen etkileşimler etkinliği azaltabilir veya biyoyararlanımı değiştirebilir. Matrise bağlı bu etkiler, postbiyotiklerin gıda ürünlerindeki pratik uygulaması değerlendirilirken gıda bileşimini ve işleme koşullarını dikkate almanın önemini vurgulamaktadır (Akhavan ve ark., 2026; Mafe ve Büsselberg, 2025; Mishra ve ark., 2024; Salminen ve ark., 2021).

Amiri ve ark (2021a), yaptıkları çalışmada zenginleştirilmiş peynir altı suyunda postbiyotik üretimine yönelik optimum parametreleri belirlemek amacıyla bir Box-Behnken deneysel tasarımı kullanmıştır. Çalışma; en uygun koşulların 38 °C inkübasyon sıcaklığı, 28 saatlik fermentasyon süresi ve %2,5 maya ekstraktı ilavesini içerdiğini belirlemiştir. Bu parametreler postbiyotik sentezini maksimize ederek süt atıksularının, özellikle de peynir altı suyunun, postbiyotik üretimi için etkili bir substrat görevi gördüğünü doğrulamıştır.

Yapılan bir çalışmada pH, sıcaklık, inkübasyon süresi ve maya ekstraktı konsantrasyonu gibi çevresel parametrelerin *Lactobacillus acidophilus* LA-5 ve *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB-12 tarafından postbiyotik sentezini nasıl etkilediğini değerlendirilmiştir. Araştırma, konjuge linoleik asit (CLA), ekzopolisakkaritler (EPS'ler) ve bakteriyosinler (BAC'ler) gibi temel biyoaktif bileşiklerin üretimine odaklanırken, aynı zamanda hem peynir altı suyu hem de süt permeatı substratları kullanılarak probiyotik suşların biyokütle verimini de dikkate almıştır. Sonuçlar pH'a bağlı bir eğilim ortaya koymuştur: yüksek pH seviyeleri EPS üretimini artırırken aynı zamanda BAC sentezini baskılamıştır. Amiri ve ark (2021b).

3.Postbiyotik Bileşenleri

Postbiyotikler, belirli mikroorganizmaların büyümesi, metabolizması, ölümü veya inaktivasyonu sırasında oluşan çeşitli bileşenlerden meydana gelen geniş bir gruba kapsamaktadır ve bu bileşikler, elementel bileşimlerine ya da konakçıya sağladıkları fizyolojik yararlar göre sınıflandırılabilir. Postbiyotikler, elementel bileşimlerine göre veya fizyolojik işlevlerine göre sınıflandırılmaktadır. Postbiyotiklerin fonksiyonel yararlarının altında yatan moleküler mekanizmaları ve etki yollarını açıklamaya yönelik çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiş olsa da standartlaştırılmış ticari uygulamaların geliştirilmesi için hâlen giderilmesi gereken önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır (Garg ve ark., 2026).

3.1. Kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar)

Postbiyotiklerin etki mekanizmaları, probiyotiklerin etki mekanizmalarından belirgin şekilde farklıdır. Probiyotikler, öncelikle bağırsak kolonizasyonu ve konakçının mikrobiyotası ve bağışıklık sistemiyle doğrudan etkileşim yoluyla sağlık yararları sağlar. Buna karşılık, postbiyotikler etkilerini dolaylı olarak mikrobiyal metabolitler yoluyla gösterir. Örneğin, postbiyotiklerde bulunan kısa zincirli yağ asitleri, bağırsak pH'ını düzenleyerek ve patojenik bakterileri inhibe ederek bağırsak sağlığını destekleyebilir (Yu ve ark., 2025).

Prebiyotik polisakkaritlerin bağırsak mikrobiyotası tarafından fermentasyonu sonucunda açığa çıkan kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar), mikrobiyal kaynaklı en önemli ve en yaygın metabolit grupları arasında yer almaktadır." Bunun yanında, ince bağırsakta tamamen sindirilemeyen protein ve peptitlerin mikrobiyal metabolizması sonucunda da sentezlenebilmektedirler. SCFA'lar, bir ila altı karbon atomu içeren karboksilik asitlerden oluşmakta olup, bunlar arasında en baskın olanlar asetik asit, propiyonik asit ve bütirik asittir. Kısa zincirli yağ asitleri, bağırsak sağlığının korunmasında kritik bir rol oynamanın yanı sıra; enerji metabolizması, bağırsak epitel bütünlüğünün sürdürülmesi ve mikrobiyal dengenin korunması gibi çeşitli fizyolojik süreçlerde de görev almaktadır. İnsan kolonunda ve dışkısında bu baskın yağ asitlerinin genellikle 3:1:1 molar oranında bulunduğu bildirilmektedir (Hernandez-Granados ve Franco-Robles, 2020; Gill ve ark., 2018; Takagi ve ark., 2016).

SCFA'lar arasında yer alan propiyonat ve bütiratın sentez yolları, büyük ölçüde fermentasyon sırasında kullanılabilen substratın türüne bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle bağırsak mikrobiyotasının bileşimi ve tüketilen besinlerin içeriği, oluşan SCFA profilini doğrudan etkileyebilmektedir. SCFA konsantrasyonları bağırsak kanalının farklı bölgelerinde önemli ölçüde değişiklik göstermekte olup, en düşük seviyeler terminal ileumda, en yüksek seviyeler ise

çekumda gözlenmektedir. Asetat, bazı bağırsak bakterileri tarafından yapısal hücresel bileşenlerin sentezinde kullanıldığı için bağırsak homeostazının korunmasına katkı sağlamaktadır. Propiyonatın metabolizması ise çoğunlukla karaciğerde gerçekleşmekte ve dışkıdaki toplam SCFA oranı bağırsakta bulunan bakteroidetes miktarıyla ilişkili bulunmaktadır. Buna karşılık bütirat, bağırsak epitel hücreleri tarafından temel enerji kaynağı olarak kullanılmakta ve glukoz metabolizmasının düzenlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca bütiratın bağırsak bariyer bütünlüğünün korunmasına, inflamasyonun azaltılmasına ve bağışıklık yanıtının düzenlenmesine katkıda bulunduğu bildirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, SCFA'ların yalnızca bağırsak sağlığı üzerinde değil, aynı zamanda immün sistemin düzenlenmesi ve bağırsak mikrobiyotası ile konak arasındaki iletişimin sürdürülmesi üzerinde de önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur (Morrison ve Preston, 2016; Kelly ve ark., 2015; Frost ve ark., 2014; Salonen ve ark., 2014; Bouter ve ark., 2018; Yu ve ark., 2025, Garg ve ark., 2026).

3.2. Proteinler ve peptidler

Bakteriler, çok çeşitli peptitlerin sentezi ve üretiminde merkezi bir rol oynar; bu moleküller, mikroorganizmaların savunma ve rekabetinde kilit işlevler üstlenir. Antimikrobiyal peptidler; mikrobiyal zararların parçalanmasının yanı sıra DNA/RNA ve protein sentezi gibi makromoleküler süreçlerin baskılanmasını da içeren pleyotropik mekanizmalarla bakteriyel patojenleri etkili bir şekilde ortadan kaldırır. Biyosentez yollarına göre iki gruba ayrılırlar: ribozomal olarak üretilenler ve ribozomdan bağımsız, özel enzim komplekslerince sentezlenenler (ribozomal olmayanlar). Bakteriler tarafından ribozomal yoldan sentezlenen peptidler, hedef hücre zarını doğrudan hasara uğratarak *in vitro* koşullarda güçlü antibakteriyel etki sergiler. Doğada yaygın olarak bulunan bu peptitlerin birincil etki mekanizmaları farklılık gösterebilmektedir: Bazı peptidler öncelikle hücre zarını hedef alıp geçirgenliği artırarak sitoplazmik içeriğin sızmasına yol açarken; diğerleri hücre içine transloke olarak DNA, RNA ve yaşamsal enzim sistemleri gibi hassas bakteriyel yapılara yönelmekte ve temel hücresel süreçleri kesintiye uğratmaktadır (Prajapati ve ark., 2023).

Antimikrobiyal peptitlerin etki mekanizması; bakteri hücre zarının depolarizasyonunu, zar üzerinde gözenek oluşumuyla hücre içeriğinin dışarı sızmasını, hedef mikroorganizmanın hassas hücresel bileşenlerinin zarar görmesini ve hidrolitik enzimlerin aktivasyonu ile hücre duvarının yapısal bütünlüğünün bozulmasını kapsamaktadır. Bu peptitlerin zar üzerinde gözenek oluşturma süreci iki temel modelle açıklanmaktadır: İlk modele göre peptidler lipit çift tabakaya dik olarak yerleşerek transmembran kanallar oluşturur; ikinci modele göre ise peptidler zar yüzeyine paralel biçimde bağlanarak deterjan

benzeri bir etkiyle membranın bütünlüğünü bozar ve parçalanmasına yol açar. Antimikrobiyal peptitlerin önemli bir kısmı, geniş spektrumlu etki gösteren ve ribozomal olarak sentezlenen bakteriyosinlerdir. Bakteriyosinler, başta laktik asit bakterileri olmak üzere çeşitli bakteriler tarafından üretilen, bakterisidal veya bakteriyostatik özellikte yüzlerce farklı peptit ya da protein molekülünü kapsar. Bu bileşikler yalnızca klinik açıdan değil, aynı zamanda gıda güvenliği bakımından da önem taşımaktadır; nitekim nisin, FDA ve EFSA gibi düzenleyici otoriteler tarafından ticari ölçekte gıda koruyucusu olarak onaylanan ilk bakteriyosin olup birçok ülkede gıda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bakteriyosinler, insan gastrointestinal sisteminde bulunan patojen mikroorganizmaların inhibisyonuna; hücre zarında gözenek oluşturarak, enzimatik aktiviteleri ve protein fonksiyonlarını değiştirerek ve hücre duvarı sentezini engelleyerek katkı sağlamaktadır. Örneğin *L. paracasei* ve *L. taiwanensis* suşları tarafından üretilen bakteriyosinlerin sırasıyla *Salmonella Gallinarum* ve enteropatojenik *E. coli*'ye karşı belirgin antimikrobiyal aktivite gösterdiği bildirilmiştir (Prajapati ve ark., 2023; Rad ve ark., 2021; Hernandez-Granados & Franco-Robles, 2020; Wegh ve ark., 2019; Aggarwal ve ark., 2022; Belguesmia ve ark., 2020; Kim ve ark., 2020).

Bunlara ek olarak bakteriyosinler; immünomodülatör, antiviral ve antikanser özellikler göstermekte, ayrıca renksiz, biyobozunur ve kokusuz olmaları gibi istenen özelliklere sahip bulunmaları sayesinde gıda, tıp ve kozmetik endüstrilerindeki uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Aggarwal ve ark., 2022; Garg ve ark., 2026).

3.3. Enzimler

Enzimler; canlı sistemlerde meydana gelen biyokimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisini düşürerek reaksiyon hızını artıran, tepkime sonunda yapısal olarak değişikliğe uğramayan ve biyolojik katalizör olarak görev yapan spesifik protein molekülleridir." Mikroorganizmalar tarafından üretilen enzimler fizyolojik, düzenleyici ve metabolik açıdan çok sayıda işlev üstlenmekte; özellikle NADH-oksidad, glutatyon peroksidaz ve süperoksit dismutaz gibi enzimler hücresel matrikste bulunan nükleik asitler, proteinler, lipidler ve karbonhidratları etkileyebilen reaktif oksijen türlerine karşı önemli savunma mekanizmaları oluşturmaktadır. Gerçekleştirdikleri biyokimyasal reaksiyon tiplerine göre mikrobiyal enzimler hidrolazlar, oksido-redüktazlar, izomerazlar, transferazlar, liyazlar ve ligazlar olmak üzere altı ana sınıfa ayrılmaktadır. Endüstriyel ölçekte enzim üretimi sınırlı sayıda mikrobiyal suş tarafından gerçekleştirilmekte olup bunlar arasında *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Aspergillus niger* ve *Aspergillus oryzae* öne çıkmaktadır. *Bacillus* türleri, yüksek verim sağlamaları ve ekstrem fizyolojik koşullarda stabil kalabilen nötral ve

alkali proteaz üretimleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Örneğin *Bacillus pumilus* kaynaklı proteolitik enzimlerin, hastane enfeksiyonlarıyla ilişkili *Serratia marcescens* biyofilmini önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca bazı *Lactobacillus fermentum* suşlarının yüksek düzeyde glutatyon peroksidaz üreterek belirgin in vitro antioksidan aktivite gösterdiği belirtilmektedir; son çalışmalar ise mikrobiyal enzimlerin biyoteknolojik ve terapötik uygulamalardaki potansiyelinin giderek arttığını ortaya koymaktadır (Singhania ve ark., 2015; Ansari ve Pourjafar, 2021; Contesini ve ark., 2017; Mitrofanova ve ark., 2017; Gurunathan ve ark., 2023; Garg ve ark., 2026).

3.4. Ekzopolisakkaritler (EPS)

Mikrobiyal ekzopolisakkaritler (EPS), kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar), peptitler, enzimler, teikoik asitler ve peptidoglikanlarla birlikte postbiyotik moleküller arasında yer almakla birlikte, karmaşık yapıları, immünomodülatör etkileri ve geniş fonksiyonel yelpazeleri nedeniyle özellikle öne çıkar. Yüksek molekül ağırlıklı karbonhidrat polimerleri olan EPS'ler serbest halde hücre dışına salgılanabilir veya kapsüller biçimde bakteriyel hücre yüzeyine bağlanabilir. Monosakkarit bileşimi, bağlanma tipleri, dallanma derecesi ve molekül ağırlığındaki farklılıkların yarattığı yapısal çeşitlilik, üretici mikroorganizmanın etkilerinin ötesine geçen zengin biyolojik aktivitelere zemin hazırlar (Pandey ve ark., 2025).

Polisakkaritler bakteriyel hücre duvarlarının temel bileşenleridir; bu bağlamda mikrobiyal EPS'ler, *L. fermentum*, *L. rhamnosus* ve *S. thermophilus* gibi türlerce üretilen önemli bir ikincil metabolit grubunu oluşturur. Gıda endüstrisindeki emülgatör, stabilizatör ve su bağlayıcı fonksiyonlarının ötesinde, bu bileşikler dikkat çekici biyoaktif niteliklere sahiptir: *L. helveticus* suşundan izole edilen üronik asit zengini bir EPS, demir bağlama yeteneği sayesinde yüksek antioksidan aktivite sergilemekte; *L. kefiranofaciens* kökenli kefiran ise deneysel hayvan modellerinde ateroskleroz ilerlemesini yavaşlatabilmektedir. β -glukanlar gibi bazı EPS grupları laktobasillerin bağırsak duvarına tutunmasını artırarak probiyotik potansiyeli güçlendirir; gastrointestinal sistemde karotenoid emilimini artırır, atopik dermatitin iyileşmesine katkı sağlar ve zararlı mikroorganizmalara karşı hücre aracılı bağışıklık yanıtını kuvvetlendirir. Genel olarak EPS'lerin; kolesterol inhibisyonu, prebiyotik etki, sağlıklı bağırsak ekolojisinin korunması, reaktif oksijen türlerine karşı antioksidan koruma, immünomodülasyon ve antimikrobiyal aktivite gibi çok sayıda fayda sergilediği bilinmektedir. Bunun yanı sıra; hiperglisemi, dislipidemi, insülin direnci, yağ birikimi ve tip 2 diyabetin yönetimine, kısmen pankreatik α -amilaz aktivitesinin inhibisyonu yoluyla, yardımcı olabildikleri raporlanmıştır. Bunun yanı sıra, kısmen pankreatik α -amilaz aktivitesini inhibe etme yetenekleri sayesinde; hiperglisemi, dislipidemi,

insülin direnci, adipoz (yağ) doku birikimi ve tip 2 diyabetin yönetiminde de destekleyici rol oynayabildikleri raporlanmıştır (Garg ve ark., 2026).

Mikrobiyal EPS'ler, özellikle *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Streptococcus thermophilus* ve *Weissella* gibi laktik asit bakterileri (LAB) tarafından üretilenler; bağırsak bariyer bütünlüğünü güçlendirme, konak bağışıklık yanıtlarını modüle etme, patojenik biyofilm oluşumunu inhibe etme ve antioksidan savunma sağlama gibi sağlık destekleyici potansiyelleri nedeniyle günümüzde önemli bir ilgi odağıdır. (Chen ve ark., 2019).

Bazı EPS türleri belirli kommensal bakteriler tarafından fermente edilebilmekte, bu da mikrobiyal ekolojide yararlı değişikliklere ve kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar) gibi sağlık açısından önemli metabolitlerin üretimine yol açmaktadır. EPS'lerin hem postbiyotik biyoaktif bileşen hem de prebiyotik substrat olarak çift yönlü işlev görmesi, onları mikrobiyota hedefli tedaviler alanında ayrıcalıklı bir konuma yerleştirmektedir. Biyoteknolojik açıdan değerlendirildiğinde, EPS'ler fizikokimyasal ve reolojik özellikleri sayesinde gıda formülasyonlarında kıvam artırıcı, emülgatör, stabilizatör ve tekstür düzenleyici olarak kullanım için oldukça değerlidir. Bu özellikler; biyoyuumluluk, biyobozunurluk ve su tutma kapasitesi ile kozmetik ve farmasötik sektörlerdeki uygulama potansiyellerini de artırmaktadır. Ayrıca EPS üretimi; fermantasyon optimizasyonu, genetik mühendisliği ve kontrollü çevresel parametreler aracılığıyla düzenlenebilmekte, böylece istenen yapısal ve fonksiyonel özelliklere sahip özelleştirilmiş EPS'lerin tasarlanmasına olanak sağlamaktadır (Liu ve ark., 2022).

EPS üretiminin karmaşık genetik ve enzimatik düzenlenişi, mikroorganizmaların çevre ve konak ile etkileşimlerini uyarlamalarına olanak tanıyan son derece esnek bir sistemi yansıtmaktadır. Bu karmaşıklığın biyoteknolojik araçlarla değerlendirilmesi, postbiyotik uygulamalar ve fonksiyonel gıdalar için özgün yapısal ve işlevsel özelliklere sahip özel tasarlanmış EPS'lerin geliştirilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bununla birlikte, geniş potansiyeline rağmen EPS'lerin klinik ve endüstriyel alanlarda yaygın kullanıma aktarılmasını sınırlayan bazı önemli engeller bulunmaktadır. Bunlar arasında suşa özgü EPS verimi ve yapısal farklılıklar, saflaştırma ve yapısal karakterizasyon zorlukları, biyoaktivitenin değerlendirilmesine yönelik standart testlerin eksikliği ve postbiyotik sınıflandırması ile sağlık beyanlarına ilişkin düzenleyici belirsizlikler yer almaktadır. Günümüzde birçok EPS çalışması in vitro modeller veya küçük ölçekli hayvan deneylerine dayanmaktadır ve insanlarda güvenlilik, farmakokinetik özellikler ile etkinliğe ilişkin veriler hâlen yetersizdir (Pandey ve ark., 2025).

3.5. Vitaminler

İnsan vücudu vitaminleri kendi başına yeterli miktarda üretemediği için bu mikrobelerin dışarıdan alınması gerekir. Vitaminler; DNA'nın kopyalanması ve onarılması, beyin ve sinir sistemi işlevleri, kalp ve kemik sağlığının korunması ile metabolizmanın düzenli çalışması gibi birçok önemli göreve sahiptir. Ayrıca, konakçı sağlığı ile doğrudan ilişkili olan bağırsak mikrobiyotası da belirli vitamin gruplarının biyosentezinde önemli bir fonksiyona sahiptir. Özellikle laktik asit bakterileri (LAB) ve *Bifidobacteria* türleri; B1, B2, B3, B6, B7, B9, B12 ve K vitamini gibi çeşitli vitaminleri sentezleyebilmektedir. B12 vitamini bitkiler ve hayvanlar tarafından üretilmez; bu vitamin esas olarak bağırsak mikrobiyotası tarafından sentezlenir. Ancak bağırsakta üretilen B12'nin emilimi sınırlıdır. Buna karşılık, bağırsak bakterilerinin ürettiği B2 vitamini (riboflavin) bağırsak hücreleri tarafından daha kolay emilebilmektedir (Garg ve ark., 2026).

Bazı mikroorganizmalar tarafından üretilen B grubu vitaminleri ve organik asitler yara iyileşmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle nanolifli yara örtülerine eklenen B12 vitamininin, sıçanlardaki yaraların daha hızlı kapanmasını sağladığı ve epitel doku kalınlığını artırdığı bildirilmiştir. Bu sonuçlar, mikrobiyal kaynaklı bileşiklerin hücre yenilenmesini destekleyerek yara onarım sürecini olumlu yönde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında, laktik asidin oluşturduğu hafif asidik ortam fibroblast aktivitesini artırmakta, anjiyogenezi desteklemekte ve kollajen birikimini teşvik etmektedir. Her ne kadar vitamin ve organik asit temelli postbiyotiklerin yara iyileştirici etkileri henüz tam olarak açıklığa kavuşmamış olsa da, mevcut klinik öncesi çalışmalar bu bileşiklerin yara tedavisinde umut verici bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Lim ve ark., 2026).

3.6. Teikoik asitler

Gram pozitif bakteriler, hücre duvarlarında bulunan teikoik asitler (TA'lar) sayesinde hücre şeklinin korunması, iyon dengesinin sağlanması ve enzim aktivitelerinin düzenlenmesi gibi önemli işlevleri yerine getirir. TA'lar, yapısına göre duvar teikoik asidi (WTA) ve lipoteikoik asit (LTA) olarak sınıflandırılır. Özellikle patojen bakterilerde bulunan LTA, bağışıklık sistemini uyarak güçlü inflamatuvar yanıtların oluşmasına neden olabilir. Ancak son çalışmalar, TA'ların yapısal farklılıklarının onların işlevlerini doğrudan etkilediğini göstermiştir (Garg ve ark., 2026). Yapılan bir çalışmada *L. paracasei*'den elde edilen lipoteikoik asitlerin yağ metabolizmasını hızlandırdığı ve antiinflamatuvar yanıt oluşturduğu bulunmuştur (Ginsburg, 2002). Teikoik asitler antioksidan, antikanser, antitümör ve immünomodülatör özellikler gibi başka faydalı etkileri de bulunmaktadır (Hernandez-Granados ve Franco-Robles, 2020; Rafique ve ark., 2023).

Staphylococcus aureus ve *Streptococcus pneumoniae* gibi patojen bakterilerde TA'lar; virölans, antibiyotik direnci ve biyofilm oluşumunu artırırken, *Lactiplantibacillus plantarum* ve *Lacticaseibacillus rhamnosus* gibi probiyotik bakterilerde antiinflamatuvar etki göstererek bağırsak bariyerini güçlendirmekte ve bağışıklık sistemini desteklemektedir. Bu durum, TA'ların yapısal özelliklerine bağlı olarak hem zararlı hem de yararlı etkiler gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Garg ve ark., 2026).

3.7. Peptidoglikan

Peptidoglikan, hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakterilerin hücre duvarında bulunan yapısal bir bileşiktir. Hücreye mekanik dayanıklılık kazandırır ve çevresel stres koşullarında bakterinin şeklinin korunmasını sağlar. Bakteri türleri arasında peptidoglikan yapısı ve bileşimi farklılık gösterebilir. Bazı bakteriler, antibiyotiklere karşı daha dirençli hale gelmek veya konak bağışıklık sisteminden kaçabilmek için peptidoglikan yapılarında çeşitli değişiklikler gerçekleştirebilir (Garg ve ark., 2026).

Yapılan bir çalışmada peptidoglikanların proinflamatuvar sitokinlerin inhibisyonuna yardımcı olduğu ve immünomodülatör, antikanser ve antitümör aktiviteler gösterdiği bulunmuştur (Q. Sun ve ark., 2022; Thakker ve Narayanan, 2023, Garg ve ark., 2026). Başka bir çalışmada ise *L. rhamnosus*'tan ekstrakte edilen peptidoglikanın nazal uygulama sonrasında akciğer hasarlarını hafiflettiği belirlenmiştir (Clua ve ark., 2017; Mehta ve ark., 2023; Garg ve ark., 2026).

3.8. Plazmalojenler

Plazmalojenler olarak bilinen lipid grubu; protozoalar, bakteriler, memeliler ve omurgasızlar dâhil birçok canlıda bulunmaktadır. Plazmalojenlerin sn-2 (R2) pozisyonunda çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) bulundurulması, onları diğer zar yapısındaki bakteriyel bileşenlerden ayırmaktadır. Araştırmalar, plazmalojenlerin hücre içinde farklı işlevlere sahip olduğunu ve bu işlevlerin özellikle sn-1 vinil eter bağı ile sn-2 pozisyonundaki PUFA yapılarıyla ilişkili olduğunu göstermektedir. Her ne kadar görevleri tam olarak açıklığa kavuşmamış olsa da plazmalojenlerin sinaptik iletimde, akciğer alveol yüzey aktif maddelerinde ve hücre zarının dinamik yapısının korunmasında rol oynadığı bilinmektedir. Ayrıca hücre zarındaki fosfolipitlerin yüzey gerilimini ve viskozitesini azaltarak hücresel sinyal iletimini güçlendirebilmektedirler (Rafique ve ark., 2023). Plazmalojenlerin hücrelerde antioksidan etki göstererek zar lipitlerini oksidatif hasardan koruduğu ve hücre zarının sinyal iletimini destekleyerek sinaptik iletişime katkı sağladığı belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar, plazmalojen takviyesinin alzheimer hastalarında bilişsel fonksiyonları iyileştirebildiğini göstermektedir. Ayrıca plazmalojenlerden türeyen yağ asitleri,

inflamasyonu azaltıcı etkileri olan ve yağ hücrelerinin oluşumunu düzenleyen G-protein bağlı reseptörler için sinyal molekülü olarak görev yapabilmektedir (Garg ve ark., 2026).

4. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Cansız mikroorganizmaların, hücre duvarı bileşenlerinin ve mikrobiyal metabolitlerin konakçı sağlığı üzerinde faydalı etkiler sağladığına dair kanıtlar giderek artmaktadır. Bu bağlamda postbiyotikler; canlı bakteriler tarafından salgılanan veya hücresel parçalanma (lisis) sonucu açığa çıkan, steril hücre ekstraktlarını ve inaktif mikrobiyal hücreleri kapsayan yeni ve umut verici bir biyoaktif gıda bileşeni kategorisi olarak öne çıkmaktadır. Yıllar içinde farklı isimlendirmelerle anılan bu alanın, ISAPP (Uluslararası Probiyotik ve Prebiyotik Bilimsel Derneği) tarafından ortak bir uzlaşma tanımı altında birleştirilmesi; endüstri, sağlık profesyonelleri ve yasal düzenleyici kurumlar arasındaki iletişimi kolaylaştırmak adına kritik bir adımdır. Bu güncel tanım; yalnızca bağırsak florasını değil, bağırsak dışı anatomik bölgeleri, hayvan ve bitki sağlığını da kapsayacak kadar geniş bir inovasyon alanı sunmaktadır.

Postbiyotikler; kanser karşıtı, anti-enflamatuvar, immünomodülatör, anti-obezojenik, anti-hipertansif, hipokolesterolemik ve antioksidan aktiviteler dahil olmak üzere geniş bir yelpazede sağlığı destekleyici etkiler sunar. Başta bakteriyosinler, kısa zincirli yağ asitleri ve ekzopolisakkaritler olmak üzere, gıda matrislerinde antimikrobiyal ve tekstürel iyileştirmelere de katkı sağlar. Bununla birlikte; bağırsakta kolonize olan mikroorganizmaların doğal olarak ürettiği bileşiklerin fizyolojik etkileri ile, dışarıdan belirli bir dozda uygulanan postbiyotik formülasyonların etkileri kavramsal olarak birbirinden ayrılmalıdır. Ayrıca, içerisinde canlılığını yitirmiş hücre barındıran her probiyotik ürün "postbiyotik" olarak sınıflandırılmaz; zira sağlanan sağlık faydasında bu cansız hücrelerin rolünün tam olarak ne olduğu halen araştırılmaya muhtaçtır.

Endüstriyel açıdan postbiyotikler, geleneksel probiyotiklere kıyasla büyük teknolojik avantajlara sahiptir. Güçlü güvenlik profilleri ile pH ve sıcaklık değişimleri gibi zorlu çevresel koşullara karşı gösterdikleri yüksek fizikokimyasal stabilite, onları gıda sistemleri için son derece elverişli kılmaktadır. Isıl veya ısıl olmayan inaktivasyon yöntemleriyle elde edilebilen bu bileşikler; tahıl bazlı ürünler, meyve suları ve fonksiyonel içecekler gibi çok çeşitli ürünlere başarıyla entegre edilebilir. Dahası; sporcular, bebekler, hamileler, psikiyatri hastaları ve astronotlar gibi spesifik fizyolojik ihtiyaçları olan gruplara yönelik, "hedefe özel uyarlanmış" kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların üretimi için muazzam bir potansiyel taşımaktadırlar. Bu potansiyelin 3 boyutlu baskı ve enkapsülasyon gibi gelişmekte olan akıllı teknolojilerle

birleştirilmesi, ürünlerin hem stabilitesini hem de biyoyararlanımını en üst düzeye çıkaracaktır.

Üretim süreçleri ve ticarileşme bağlamında ise aşılması gereken bazı zorluklar mevcuttur. Günümüzde postbiyotik üretimi büyük ölçüde maliyetli sentetik besiyerlerine dayanmaktadır. Maliyetleri düşürmek, çevresel ayak izini küçültmek ve biyoekonomiyi desteklemek adına tarımsal atıkların ve yan ürünlerin alternatif fermentasyon substratı olarak kullanılması, sürdürülebilir üretim için anahtar niteliğindedir. Öte yandan, mikrobiyal metabolizma çevresel faktörlere son derece duyarlı olduğundan; üretim sürecinde yaşanabilecek beklenmedik varyasyonları (değişkenlikleri) engellemek için tekdüze ve kesin sınırları belirlenmiş standart kültür prosedürlerinin geliştirilmesi zorunludur. Üreticilerin piyasada farklı terminolojiler kullanması ve detaylı miktar tayinine (kantifikasyon) yönelik yasal düzenleme çerçevelerinin (regülasyonların) henüz tam olarak kurulamaması, bu biyoaktif bileşenlerin pazar kabul edilebilirliğini ve ticarileşmesini zorlaştırmaktadır.

Özetle; postbiyotiklerle ilgili bilimsel literatür hızla genişlese de deneysel tasarımlardaki ve değerlendirme modellerindeki heterojenlik nedeniyle mevcut kanıtlar bütüncül olmaktan ziyade parçalı bir görünüm sergilemektedir. Postbiyotiklerin gıda bilimi ve insan sağlığındaki tüm potansiyelinin açığa çıkarılabilmesi için; hangi cansız mikroorganizmaların ve metabolitlerin sağlık faydası sağladığının belirlenmesine, hücre içi sinyal yollarını kapsayan etki mekanizmalarının netleştirilmesine ve tüketici güvenliğinin her yönüyle incelenmesine ihtiyaç vardır. İleriye dönük olarak, sağlık beyanlarının bilimsel bir zemine oturtulabilmesi ve bu ürünlerin gıda sistemlerine güvenle entegre edilebilmesi için metabolomik çalışmalarla desteklenen, standartlaştırılmış, randomize ve plasebo kontrollü kapsamlı klinik araştırmalara öncelik verilmelidir.

Kaynaklar

- Aggarwal, S., Sabharwal, V., Kaushik, P., Joshi, A., Aayushi, A., & Suri, M. (2022). Postbiotics: From emerging concept to application. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.887642>
- Aguilar-Toala, J. E., et al. (2019). In silico prediction and in vitro assessment of multifunctional properties of postbiotics obtained from two probiotic bacteria. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 12, 608–622. <https://doi.org/10.1007/s12602-017-9354-y>.
- Aguilar-Toalá, J. E., Garcia-Varela, R., Garcia, H. S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A. F., Vallejo-Cordoba, B., & Hernández-Mendoza, A. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.009>
- Akhavan, F., Bari, M. R., Noori, S. M. A., & Amiri, S. (2026). *Postbiotics: Production to consumption as natural enhancers and preservatives in the food industry*. *Food Bioscience*, 80, 108865. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2026.108865>
- Al-Habsi, N., Al-Khalili, M., Haque, S. A., Elias, M., Olqi, N. A., & Al Uraimi, T. (2024). Health benefits of prebiotics, probiotics, synbiotics, and postbiotics. *Nutrients*, 16, 3955. <https://doi.org/10.3390/nul6223955>
- Amiri, S., Mokarram, R. R., Khiabani, M. S., Bari, M. R., & Alizadeh, M. (2021a). Optimization of food-grade medium for co-production of bioactive substances by lactobacillus acidophilus LA-5 for explaining pharmabiotic mechanisms of probiotic. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 1–12. Amiri, S., Mokarram, R. R., Khiabani, M. S., Bari, M. R., <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04894-5>
- Amiri, S., Rezazadeh, M., Alizadeh, M., & Rezaei, R. (2021b). Co-production of conjugated linoleic acids, exopolysaccharides and bacteriocins by lactobacillus acidophilus LA5 and Bifidobacterium animalis subsp. lactis BB12 in supplemented dairy effluents. *Chem Rev Lett*, 4, 66–76.
- Ansari, F., & Pourjafar, H. (2021). Nondairy foods as potential carriers of probiotic bacteria and postbiotics. In N. Mojgani, & M. Dadar (Eds.), *Probiotic bacteria and postbiotic metabolites: Role in animal and human health* (pp. 351–373). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0223-8_15
- Barba, F. J., Kouba, M., do Prado-Silva, L., Orlén, V. & Sant’Ana, A. D. S. Mild processing applied to the inactivation of the main foodborne bacterial pathogens: a review. *Trends Food Sci. Technol.* 66, 20–35 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6>
- Belguesmia, Y., Bendjeddou, K., Kempf, I., Boukherroub, R., & Drider, D. (2020). Heterologous biosynthesis of five new class II bacteriocins from

- Lactobacillus paracasei* CNCM I-5369 with antagonistic activity against pathogenic *Escherichia coli* strains. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01198>
- Blazheva, D., Mihaylova, D., Averina, O. V., Slavchev, A., Brazkova, M., Poluektova, E. U., Danilenko, V. N., & Krastanov, A. (2022). Antioxidant potential of probiotics and postbiotics: A biotechnological approach to improving their stability. *Russian Journal of Genetics*, 58, 1036–1050. <https://doi.org/10.1134/S1022795422090058>
- Bouter, K. E., Bakker, G. J., Levin, E., Hartstra, A. V., Kootte, R. S., Udayappan, S. D., Katiraci, S., Bahler, L., Gilijamse, P. W., Tremaroli, V., Stahlman, M., Holleman, F., van Riel, N. A. W., Verberne, H. J., Romijn, J. A., Dallinga-Thie, G. M., Serlie, M. J., Ackermans, M. T., Kemper, E. M., ... Nieuwdorp, M. (2018). Differential metabolic effects of oral butyrate treatment in lean versus metabolic syndrome subjects. *Clinical and Translational Gastroenterology*, 9, Article e155. <https://doi.org/10.1038/s41424-018-0025-4>.
- Calvanese, C. M., Villani, F., Ercolini, D., & De Filippis, F. (2025). Postbiotics versus probiotics: Possible new allies for human health. *Food Research International*, 217, 116869. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116869>
- Capozzi, V., Russo, P., Duenas, M. T., Lopez, P., & Spano, G. (2012). Lactic acid bacteria producing B-Group vitamins: A great potential for functional cereals products. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96, 1383–1394. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4440-2>
- Charoux, C. M. G. et al. Effect of non-thermal plasma technology on microbial inactivation and total phenolic content of a model liquid food system and black pepper grains. *LWT* 118, 108716 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108716>
- Chung, C.-R., Kuo, T.-R., Wu, L.-C., Lee, T.-Y., & Horng, J.-T. (2020). Characterization and identification of antimicrobial peptides with different functional activities. *Briefings in Bioinformatics*, 21, 1098–1114. <https://doi.org/10.1093/bib/bbz043>
- Contesini, F. J., Melo, R. R.d., & Sato, H. H. (2017). An overview of *Bacillus* proteases: From production to application. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38, 321–334. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1354354>.
- Delorme, C. (2008). Safety assessment of dairy microorganisms: *Streptococcus thermophilus*. *Int. J. Food Microbiol.* 126, 274–277. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.08.014>.
- Elshobary, M. E., El-Shenody, R. A., Ashour, M., Zabed, H. M., & Qi, X. (2020). Antimicrobial and antioxidant characterization of bioactive components

- from *Chlorococcum Minutum*. *Food Bioscience*, 35, Article 100567. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100567>
- Frost, G., Sleeth, M. L., Sahuri-Arisoylu, M., Lizarbe, B., Cerdan, S., Brody, L., Anastasovska, J., Ghourab, S., Hankir, M., Zhang, S., Carling, D., Swann, J. R., Gibson, G., Viardot, A., Morrison, D., Louise Thomas, E., & Bell, J. D. (2014). The short-chain fatty acid acetate reduces appetite via a central homeostatic mechanism. *Nature Communications*, 5. <https://doi.org/10.1038/ncomms4611>.
- Garg, S., Kambhampati, V., & Mishra, S. (2026). Multifunctional postbiotics for clean-label foods: A review of sustainable production, industrial applications, and regulatory aspects. *Food Bioscience*, 80, 108972. <https://doi.org/10.3390/vetsci12121191>
- Gill, P. A., van Zelm, M. C., Muir, J. G., & Gibson, P. R. (2018). Review article: Short chain fatty acids as potential therapeutic agents in human gastrointestinal and inflammatory disorders. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 48, 15–34. <https://doi.org/10.1111/apt.14689>
- Ginsburg, I. (2002). Role of lipoteichoic acid in infection and inflammation. *The Lancet Infectious Diseases*, 2, 171–179. [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(02\)00226-8](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(02)00226-8)
- Giraffa, G. (2002). Enterococci from foods. *FEMS Microbiol. Rev.* 26,163–171. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2002.tb00608.x>
- Giraffa, G., Carminati, D., and Neviani, E. (1997). Enterococci Isolated from Dairy Products: A Review of Risks and Potential Technological Use. *J. Food Prot.* 60, 732–738. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-60.6.732>
- Guglielmetti, S., Boyte, M.-E., Smith, C. L., Ouwehand, A. C., Paraskevatos, G., & Younes, J. A. (2025). Commercial and regulatory frameworks for postbiotics: An industry-oriented scientific perspective for non-viable microbial ingredients conferring beneficial physiological effects. *Trends in Food Science and Technology*, 163, Article 105130. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105130>
- Gurunathan, S., Thangaraj, P., & Kim, J.-H. (2023). Postbiotics: Functional food materials and therapeutic agents for cancer, diabetes, and inflammatory diseases. *Foods*, 13, 89. <https://doi.org/10.3390/foods13010089>
- Hassan, M. M., Xu, Y., Sayada, J., Zareef, M., Shoaib, M., Chen, X., Li, H., & Chen, Q. (2025). Chemometrics-Powered spectroscopic techniques for the measurement of food-derived phenolics and vitamins in foods: A review. *Food Chemistry*, 473, Article 142722. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142722>

- Hernández-Granados, M. J., & Franco-Robles, E. (2020). Postbiotics in human health: Possible new functional ingredients? *Food Research International*, 137, Article 109660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109660>
- Hols, P., Hancy, F., Fontaine, L., Grossiord, B., Prozzi, D., Leblond-Bourget, N., Decaris, B., Bolotin, A., Delorme, C., Dusko Ehrlich, S., et al. (2005). New insights in the molecular biology and physiology of *Streptococcus thermophilus* revealed by comparative genomics. *Fems Microbiol. Rev.* 29, 435–463. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2005.04.008>
- Ikram, A., Safdar, S. Z., Arshad, M. T., Rasheed, A., & Gnedeka, K. T. (2024). An overview of postbiotics: Unveiling their distinct role in gut health. *Food and Agricultural Immunology*, 35(1), 2434463. <https://doi.org/10.1080/09540105.2024.2434463>
- İçier, S., Güzelcan, C., Hıdır, Ş., & Kaplan Türköz, B. (2022). Postbiyotikler ve gıda endüstrisinde kullanım alanları. *GIDA*, 47(2), 252–265. <https://doi.org/10.15237/gida.GD21145>
- Kapustian, A. I., Chernob, N., Kovalenko, A., Naumenko, K., & Kushnir, I. (2018). Products of metabolism and processing of lactic acid bacteria as functional ingredients. *Food Sciene Applied Biotechnology*, 1, 47 <https://doi.org/10.30721/fsab2018.v1.i1.13>
- Kim, S. W., Ha, Y. J., Bang, K. H., Lee, S., Yeo, J.-H., Yang, H.-S., Kim, T.-W., Lee, K. P., & Bang, W. Y. (2020). Potential of bacteriocins from *Lactobacillus taiwanensis* for producing bacterial ghosts as a next generation vaccine. *Toxins*, 12, 432. <https://doi.org/10.3390/toxins12070432>
- Lai, Z., Yuan, X., Chen, H., Zhu, Y., Dong, N., & Shan, A. (2022). Strategies employed in the design of antimicrobial peptides with enhanced proteolytic stability. *Biotechnol Adv*, 59, Article 107962. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107962>
- Leghari, A., Khand, F. M., Laghari, S., & Lakho, S. A. (2026). Engineering bioavailability: Polysaccharide-protein-lipid delivery platforms for postbiotic therapeutics in gastrointestinal and systemic disorders. *International Journal of Biological Macromolecules*, 351, 151123. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151123>
- Lei, J., Sun, L., Huang, S., Zhu, C., Li, P., He, J., Mackey, V., Coy, D. H., & He, Q. (2019). The antimicrobial peptides and their potential clinical applications. *American Journal Translations Research*, 11, 3919–3931.
- Lim, H. S., Serpell, C. J., Ogawa, S., Hu, Y. Y., & Wong, E. H. (2026). *From ferments to fixers: Postbiotics in wound healing. Medicine in Drug Discovery*, 29, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.medidd.2026.100249>
- Liu, D., Guo, Y., Yolandani, Ma, H., & Ashokkumar, M. (2023). Dynamic changes of microbial communities during natural solid-state fermentation of soybean

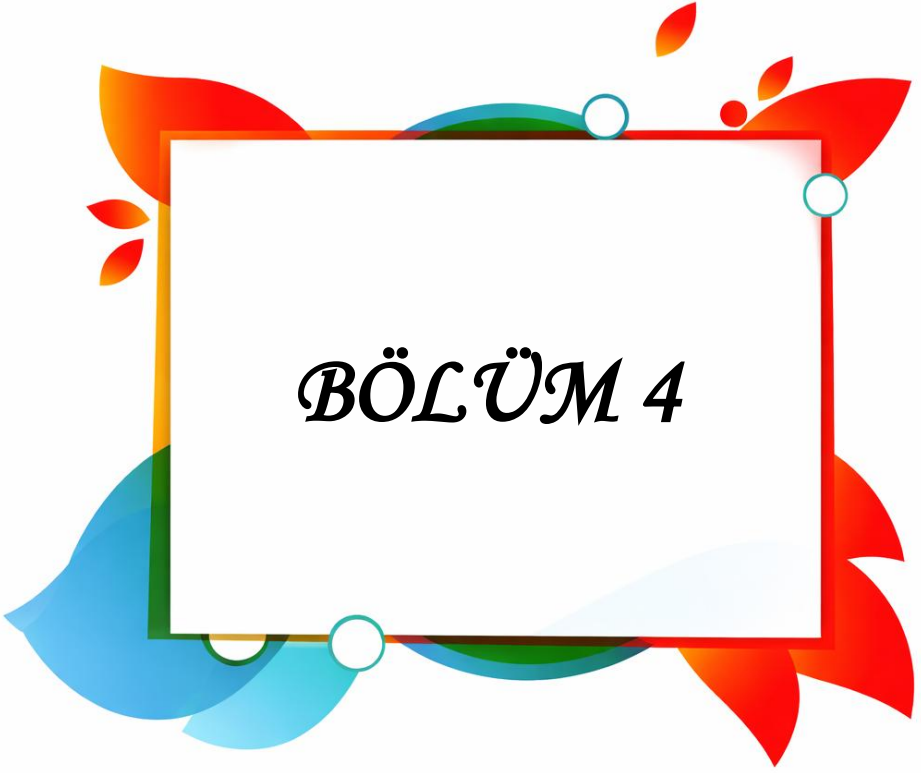
- meal and isolation of dominant bacteria for peptide production. *Food Bioscience*, 56, Article 103154. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103154>
- Mafe, A. N., & Büsselberg, D. (2025). Probiotics and postbiotics for green control of foodborne pathogens: Intelligent detection and biopreservation strategies for safer foods. *Foods*, 14(18), 3281. <https://doi.org/10.3390/foods14183281>
- Mimitsuka, T., Sawai, K., Kobayashi, K., Tsukada, T., Takeuchi, N., Yamada, K., Ogino, H., & Yonehara, T. (2015). Production of D-Lactic acid in a continuous membrane integrated fermentation reactor by genetically modified *saccharomyces cerevisiae*: Enhancement in d-Lactic acid carbon yield. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 119, 65–71 <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.06.002>
- Mishra, A., & Jha, B. (2013). Microbial exopolysaccharides. In E. Rosenberg, E. F. DeLong, S. Lory, E. Stackebrandt, & F. Thompson (Eds.), *The prokaryotes* (pp. 179–192). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-31330-1 https://doi.org/10.1007/978-3-642-31331-8_25
- Mishra, B., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Yadavalli, R., Agrawal, D. C., Reddy, H. P., et al. (2024). Postbiotics: The new horizons of microbial functional bioactive compounds in food preservation and security. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00200-w>
- Mitrofanova, O., Mardanova, A., Evtugyn, V., Bogomolnaya, L., & Sharipova, M. (2017). Effects of *Bacillus* Serine proteases on the bacterial biofilms. *BioMed Research International*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/8525912>
- Morrison, D. J., & Preston, T. (2016). Formation of short chain fatty acids by the gut microbiota and their impact on human metabolism. *Gut Microbes*, 7, 189–200. <https://doi.org/10.1080/19490976.2015.1134082>
- Osman, A., El-Gazzar, N., Almanaa, T.N., El-Hadary, A., and Sitohy, M. (2021). Lipolytic Postbiotic from *Lactobacillus paracasei* Manages Metabolic Syndrome in Albino Wistar Rats. *Molecules* 26, 472. <https://doi.org/10.3390/molecules26020472>
- Pandey, K., Prakash T. V., G., Gosai, H., Bhatia, D., & Patel, R. (2025). Microbial exopolysaccharides as postbiotics: Structure, function, and translational potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 330, 147956. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147956>
- Prajapati, N., Patel, J., Singh, S., Yadav, V. K., Joshi, C., Patani, A., Prajapati, D., Sahoo, D. K., & Patel, A. (2023). Postbiotic production: Harnessing the power of microbial metabolites for health applications. *Frontiers in Microbiology*, 14, 130619. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1306192>
- Rad, A. H., Aghebati-Maleki, L., Kafil, H. S., Gilani, N., Abbasi, A., & Khani, N. (2021). Postbiotics, as dynamic biomolecules, and their promising role in

- promoting food safety. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11, 14529–14544. <https://doi.org/10.33263/briac116.1452914544>
- Rafique, N., Jan, S. Y., Dar, A. H., Dash, K. K., Sarkar, A., Shams, R., Pandey, V. K., Khan, S. A., Amin, Q. A., & Hussain, S. Z. (2023). *Promising bioactivities of postbiotics: A comprehensive review. Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100708>
- Ramirez-Hernandez, A., Brashears, M. M., & Sanchez-Plata, M. X. (2018). Efficacy of lactic acid, lactic acid–acetic acid blends, and peracetic acid to reduce salmonella on chicken parts under simulated commercial processing conditions. *Journal of Food Protection*, 81, 17–24. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-087>
- Ray, S., Kumar, P., & Mandal, M. (Eds.). (2024). *Antimicrobial peptides from lactic acid bacteria: Diversity, biosynthesis and applications*. Singapore: Springer Nature Singapore. ISBN 978-981-97-3412-2. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-3413-9>
- Sakai, Y., Tsukahara, T., Bukawa, W., Matsubara, N., and Ushida, K. (2006). Cell preparation of *Enterococcus faecalis* strain EC-12 prevents vancomycin-resistant enterococci colonization in the cecum of newly hatched chicks. *Poult. Sci.* 85, 273–277. <https://doi.org/10.1093/ps/85.2.273>.
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M., et al. (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>
- Sharma, M., & Shukla, G. (2016). Metabiotics: One step ahead of probiotics; an insight into mechanisms involved in anticancerous effect in colorectal cancer. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01940>
- Sheikhi, S., Esfandiari, Z., Rostamabadi, H., Noori, S. M. A., Sabahi, S., & Nasab, M. S. (2025). Microbial safety and chemical characteristics of sausage coated by chitosan and postbiotics obtained from *Lactobacillus bulgaricus* during cold storage. *Scientific Reports*, 15, 358. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92136-z>
- Singhania, R. R., Patel, A. K., Thomas, L., Goswami, M., Giri, B. S., & Pandey, A. (2015). Industrial enzymes. In R. H. Ashok Pandey, M. Taherzadeh, K. Madhavan Nampoothiri, & C. Larroche (Eds.), *Industrial biorefineries & white biotechnology* (pp. 473–497). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00015-X>
- Siragusa, G.R. (1992). Production of bacteriocin inhibitory to *Listeria* species by *Enterococcus hirae*. *Appl. Environ. Microbiol.* 58, 3508–3513. <https://doi.org/10.1128/aem.58.11.3508-3513.1992>

- Sun, Q., Liu, X., & Li, X. (2022). Peptidoglycan-based immunomodulation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106, 981–993. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11795-4>
- Takagi, R., Sasaki, K., Sasaki, D., Fukuda, I., Tanaka, K., Yoshida, K.-i., Kondo, A., & Osawa, R. (2016). A single-batch fermentation system to simulate human colonic microbiota for high-throughput evaluation of prebiotics. *Plos One*, 11, Article e0160533. 10.1371. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160533>
- Tang, H. W., Phapugrangkul, P., Fauzi, H. M., & Tan, J. S. (2022). Lactic acid bacteria Bacteriocin, an antimicrobial peptide effective against multidrug resistance: A comprehensive review. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 28, 14. <https://doi.org/10.1007/s10989-021-10317-6>
- Thakker, D. P., & Narayanan, R. (2023). Arginine deiminase produced by lactic acid bacteria as a potent anti-cancer drug. *Medical Oncology*, 40. <https://doi.org/10.1007/s12032-023-02043-4>
- Tong, Y., Guo, H.n., Abbas, Z., Zhang, J., Wang, J., Cheng, Q., Peng, S., Yang, T., Bai, T., Zhou, Y., Li, J., Wei, X., Si, D., & Zhang, R. (2023). Optimizing postbiotic production through solid-state fermentation with *Bacillus amyloliquefaciens* J and *Lactiplantibacillus plantarum* SN4 enhances antibacterial, antioxidant, and antiinflammatory activities. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229952>
- Tufail, T., Ain, H. B. U., Virk, M. S., Ashraf, J., Ahmed, Z., Khalil, A. A., Rasheed, A., & Xu, B. (2025). GABA (γ -Aminobutyric acid) enrichment and detection methods in cereals: Unlocking sustainable health benefits. *Food Chemistry*, 464, Article 141750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141750>
- Ullah, M., Naeem, M., Andoh, V., Khan, M. N., Han, J., Rizwan, M., Hussain, N., Saeed, M., Chen, Y., & Chen, H. (2025). Lactic acid bacteria as biofactories: Mechanistic insights, engineering strategies, and future Horizons for heterologous enzyme expression. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73, 16028–16048. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c02311>
- Vera-Santander, V. E., Mani-Lopez, ' E., Lopez-Malo, ' A., & Jim'enez-Munguía, M. T. (2024). Use of whey for a sustainable production of postbiotics with potential bioactive metabolites. *Sustainable Food Technology*, 2, 1101–1112. <https://doi.org/10.1039/d4fb00061g>
- Vinderola, G., Sanders, M. E., & Salminen, S. (2022). The concept of postbiotics. *Foods*, 11(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/foods11081077>
- Wang, D., Cai, M., Wang, T., Liu, T., Huang, J., Wang, Y., & Granato, D. (2020). Ameliorative effects of L-Theanine on Dextran Sulfate Sodium induced colitis in C57BL/6J mice are associated with the inhibition of inflammatory responses and attenuation of intestinal barrier disruption. *Food Research*

- Wegh, C. A. M., Geerlings, S. Y., Knol, J., Roeselers, G., & Belzer, C. (2019). Postbiotics and their potential applications in early life nutrition and beyond. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 4673. <https://doi.org/10.3390/ijms20194673>
- Wei, L., Wang, B., Bai, J., Zhang, Y., Liu, C., Suo, H., & Wang, C. (2024). Postbiotics are a candidate for new functional foods. In , 23. *Food chemistry: X*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101650>
- Wibowo, D., & Zhao, C.-X. (2019). Recent achievements and perspectives for large-scale recombinant production of antimicrobial peptides. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 659–671. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9524-1>
- Wu, J., Zhang, Z., Lan, H., Sun, T., Li, Z., Hung, W., Hu, H., Yang, Z., & Zhang, J. (2025). Response surface analysis and anti-inflammatory activity of a potential postbiotic exopolysaccharide produced by probiotic *Lactocaseibacillus paracasei* K56. *Journal of Functional Foods*, 135, 107126. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2025.107126>
- Xiao, X., Shen, N., Tu, Z., Bai, J., Zhao, Y., Zhu, L., Zhang, Z., & Fan, S. (2025). Nutritional and functional enhancement of cereal-based foods through lactic acid bacteria fermentation: Focusing on postbiotics. *Food Bioscience*, 74, 107871. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107871>
- Y. Chen, M. Zhang, F. Ren, A role of exopolysaccharide produced by *Streptococcus thermophilus* in the intestinal inflammation and mucosal barrier in Caco-2 monolayer and dextran sulphate sodium-induced experimental murine colitis, *Molecules* 24 (3) (2019). <https://doi.org/10.3390/molecules24030513>
- Y. Liu, J. Wang, C. Wu, Modulation of gut microbiota and immune system by probiotics, pre-biotics, and post-biotics, *Front. Nutr.* 8 (2022) 634897 <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.634897>
- Yao, M., Yang, Y., Fan, J., Ma, C., Liu, X., Wang, Y., Wang, B., Sun, Z., McClements, D. J., Zhang, J., et al. (2024). Production, purification, and functional properties of microbial fibrinolytic enzymes produced by microorganism obtained from soy-based fermented foods: Developments and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64, 3725–3750. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2134980>
- Yikmis, S. New approaches in non-thermal processes in the food industry. *Int. J. Nutr. Food Sci.* 5, 344–351 (2016). <https://doi.org/10.1164 8/j.ijnfs.20160505.15>
- Yu, Q., Zhu, J., Huang, M., Bai, J., Zhu, Y., Zhao, Y., Yang, Y., & Xiao, X. (2025). Postbiotic delivery via alginate encapsulation alleviates DSS-induced colitis

- by modulating gut microbiota and SCFA-mediated immune signaling. *Food Research International*, 221(Part 3), 117394. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117394>
- Zago' lski, O., Stre k, P., Kasproicz, A., and Bialecka, A. (2015). Effectiveness of Polyvalent Bacterial Lysate and Autovaccines Against UpperRespiratory Tract Bacterial Colonization by Potential Pathogens: A Randomized Study. *Med. Sci. Monit.* 21, 2997–3002. <https://doi.org/10.12659/MSM.893779>
- Zalan, ' Z., Huda'cek, J., St 'etina, J., Chumchalova, ' J., & Hal'asz, A. (2010). Production of organic acids by lactobacillus strains in three different media. *European Food Research and Technology*, 230, 395–404. <https://doi.org/10.1007/s00217-009-1179-9>
- Zhang, H.-R., Meng, J., Hao, Y.-P., Xi, J., Ding, C.-H., Song, J.-Q., Wang, X.-Y., Li, Z.-C., Meng, Y., & Yang, J.-Y. (2026). *The dual role of teichoic acids in gram-positive bacteria: Structural diversity dictates pathogenic and probiotic functions.* *International Journal of Biological Macromolecules*, 350, 150925. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.150925>
- Zhang, T., Zhang, W., Feng, C., Kwok, L.-Y., He, Q., & Sun, Z. (2022). Stronger gut microbiome modulatory effects by postbiotics than probiotics in a mouse colitis model. *Npj Scienc Food*, 6, 53. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00169-9>



BÖLÜM 4

Sous Vide Pişirme Yönteminin Et ve Sebze Ürünlerinin Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri

Serpil Yalım Kaya¹

1. GİRİŞ

İnsanlığın varoluşundan beri en temel ihtiyaçlarından bir tanesi beslenmedir. İnsanların temel ihtiyacı olan beslenme, bireylerin sağlıklı ve verimli şekilde daha uzun süre yaşaması için ihtiyaç duyduğu enerji ve besin öğelerini yeterli miktarda sağlayabilen besinlerin, besin değerlerini kaybetmeden sağlığa yararlı ve en ekonomik şekilde alınmasıdır (Tanır vd., 2001). İnsanların hayatlarını idame ettirmesinde tüketilecek olduğu besinlerin herhangi birini almadığında veya ihtiyacından daha fazla ya da az aldığı durumlarda büyüme ve gelişmelerinin olumsuz etkilendiği ve insan sağlığının bozulduğu bilimsel çalışmalarla desteklenmiştir (Baysal, 1993). Sanayi devrimiyle beraber insanların yoğun mesailerde uzun zaman geçirmesi ve kadınların da iş hayatında yer alması ile beslenme ve yemek kültüründe değişimler yaşanmıştır. Bu durum hızlı ve pratik şekilde hazırlanabilen besleyici, lezzetli ve sağlıklı yiyeceklerle olan talebi arttırmış olup hazır yemek ve hazır yemek teknolojisinin önem kazanmasını sağlamıştır (Oğuzhan ve Yangılar, 2014). İnsanların çalışma saatlerinin değişip yoğunlaşmasıyla tükettiği ürünler de değişmiş, daha çok büyük şehirlerde hızlı şekilde hazırlanabilen sıcak ve soğuk hazır yemek sunan birçok yiyecek içecek işletmesi faaliyete geçmiş ve günümüzün temellerini atmıştır (Ünlüsayın, 2008). Gıda ürünlerinin hızlı bir şekilde hazırlanma aşamasında gıdalardaki hücre zarında parçalanma, protein denatürasyonu, doku ve görünümde değişiklikler ve besin değerlerinde kayıplar meydana gelebilmektedir (Rekhy ve McConchie, 2014). Günümüzde ise tüketiciler sağlıklı ürünlere yönelmekte olup besin değerini kaybetmeden mikrobiyolojik vb. etmenler açısından daha sağlıklı pişirme yöntemi olan sous vide ile işlenmiş gıdalara yönelik tutumları ve satın alma niyetlerini etkileyebilmektedir (Kozup vd., 2003).

Sous vide, ‘vakum altında’ anlamına gelen, vakumlu ve ısıya dayanıklı poşetlerde pişirme yöntemi olarak da bilinmektedir. İlk olarak Fransa’da Georges Pralus tarafından 1960’lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Sous vide yöntemi ile belirli sıcaklık ve zaman aralığında sıcak su içerisinde pişen ürünler, ısının sudan ürüne verimli ve kesintisiz şekilde geçmesini sağlar. Sous vide yöntemiyle

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Mersin Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, ORCID: 0000-0002-4762-596X

daha az protein denatürasyonu, yüksek besin değerleri, mikrobiyal güvenlik ve oksidatif değişiklikleri engelleyerek depolama sırasında daha uzun bir raf ömrü sağlanır (Yılmaz ve Bilici, 2014). Dünyanın ileri gelen restoranlarından bazılarında görev alan şefler uzun süredir sous vide yöntemini kullanmaktadır. Fakat sous vide yöntemi 2000'lerin ortalarına kadar geniş bir alanda bilinmiyordu (Baldwin, 2012; Hesser, 2005; Jeong vd., 2018; Schellekens, 1996). Hassas sıcaklık kontrolü şefler için vakumlu pişirmeden çok daha fazlasını ifade eder. Sıcaklık kontrolü ile şefler her zaman aynı mükemmel sonuçları elde ederek misafirlerine her zaman aynı hazzı yaşatabilirler (Keller vd., 2008; Blumenthal, 2008).

Sous vide pişirme yöntemi ile elde edilen ürünlerin kalitesi, pişirme sırasında uygulanacak olan sıcaklık, zaman ve basınçtan önemli ölçüde etkilenir. Sous vide yöntemi oksidatif değişikliklerin oluşumunu engeller ve aerobik bakterilerin büyümesini azaltarak depolama sırasında oluşabilecek kontaminasyonun önüne geçer ve ürünlerin raf ömrünü uzatır. Yiyecekler ısıya dayanıklı vakumlu poşetlerde kontrollü sıcaklıklarda belirli süreler boyunca pişirilip ardından servis edilebilir ya da pişirilip soğutulur veya dondurulabilir (Kehlet vd., 2017). Sous vide ile pişen ürünlerin tüketim aşamasında gıdalarda bulunan patojenlerin varlığının, pişirme sırasında hayatta kalan ham maddelerden kaynaklandığı gösterilmiştir. Bunlar; *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Vibrio*, *Staphylococcus aureus*, *Campylobacter*, *Listeria monocytogenes*, *Yersinia*, *Aeromonas*, *Clostridium botulinum*, mezofilik *B. cereus* ve *Clostridium perfringens* patojenleridir (Stringer ve Metris, 2018).

Bu çalışmayla sous vide pişirme yöntemi ile gıdalardaki besinsel değer, mikrobiyolojik ve fizyokimyasal özellikler diğer pişirme yöntemleriyle kıyaslanarak sous vide pişirme yönteminin avantajları ve dezavantajları gözden geçirilecektir. Bu doğrultuda, sous vide ile ilgili mevcut uygulama ve çalışmalar incelenerek gıda sektörü ve bireylerin gelecekteki eğilimler hakkında fikir sahibi olması ve beraberinde yiyeceklerden maksimum şekilde nasıl faydalanabilecekleri ile beslenme alışkanlıklarını gözden geçirmeleri sağlanacaktır. Bu çalışmada modern pişirme tekniklerinden olan sous vide pişirme tekniğinin et ürünleri ve sebze ürünlerine yönelik son yıllarda yapılmış bazı çalışmalar derlenmiştir.

Bölümün ilerleyen kısımlarında öncelikle sous vide pişirme yönteminin et ve et ürünlerinin fizyokimyasal, mikrobiyolojik ve duyu kalite özellikleri üzerindeki etkileri; ardından sebze ürünlerine yönelik bulgular ele alınacaktır. Son olarak, bu yöntemin gıda işletmeleri açısından sunduğu avantajlar ve dezavantajlar karşılaştırmalı biçimde değerlendirilecek ve bölüm, elde edilen bulguların genel bir sentezi ile sonlandırılacaktır.

2. SOUS VIDE PİŞİRME YÖNTEMİNİN ET ÜRÜNLERİNE ETKİSİ

2.1. Etin Kalite Özellikleri ve Pişirme Sırasında Gerçekleşen Temel Değişimler

İnsanların günlük yaşamlarında sağlıklı ve dengeli beslenebilmesi için tüketmesi gereken protein miktarının %40-50'si hayvansal kökenli olmalıdır. Proteini bol miktarda içeren temel besin kaynaklarımızdan bir tanesi de ettir (Göğüş, 1986). Günümüz dünyasında tüketiciler ödedikleri ücretin karşılığında aldıkları ürünün kaliteli olmasını ister. Etin kalitesi ise renk, yumuşaklık, sululuk, tazelik, lezzet ve güvenilirlik ile ilişkilendirilir. Tüketicilerin genel algısı kırmızı renkli etin kahverengi etten daha taze olduğu yönündedir. Taze etlerde bazı problemler görülebilmektedir; bunlar mikrobiyal bozulma, ölüm sonrası ette gerçekleşen sertleşme ve yağ oksidasyonudur. Mikrobiyal problemler hastalıklara sebep olabilirken, yağ oksidasyonundan kaynaklanan sorunlar ise kötü koku, renk ve kötü tat gibi problemlere yol açabilmektedir (Zavadlav vd., 2020).

Etin pişirimi miyoglobin, oksimiyoglobin ve metmiyoglobin gibi proteinlerin denatürasyonu, etin rengini belirlemede önemli bir faktördür. Bu üç pigment arasındaki temel fark, miyoglobin molekülünün merkezinde yer alan demir atomunun oksidasyon durumu ve buna bağlanan ligandın türüdür. Oksijenle temas eden taze et yüzeyinde miyoglobin oksitlenerek parlak kırmızı renkli oksimiyoglobine dönüşür; ısı işlem sırasında ise sıcaklığa bağlı olarak demir iyonu Fe^{2+} 'den Fe^{3+} 'e yükseltgenir ve kahverengimsi metmiyoglobin oluşur. Sous vide gibi düşük sıcaklıkta ve oksijenle teması en aza indirilmiş ortamlarda pişirilen ürünlerde bu oksidasyon basamağı geciktirilebildiğinden, et yüzeyinde geleneksel pişirme yöntemlerine kıyasla farklı bir renk profili gözlenir. Ette bulunan proteinlerin hangisinin kaç dakika ve kaç derecede ısıya maruz bırakılarak denatüre edildiği etin rengini belirlemede önemli bir ölçüdür (Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013). Et işlemede sentetik ve koruyucu maddeleri azaltabilen teknolojiler, sous vide tekniği gibi modern pişirme yöntemiyle pişirimlerinin sağlanmasıyla depolanması açısından önemli bir yer almaktadır (Baldwin, 2012; Roldán vd., 2015; Zemser, 2015). Tüketiciler ise ihtiyaçları doğrultusunda tükettikleri temel gıdaların kalitesine, içeriğine ve lezzetine önem vermektedir. Sous vide tekniği et ve et ürünleri üzerinde sağlıklı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi gibi birçok olumlu etkiye sahiptir (Ayub ve Ahmad, 2019). Sous vide yöntemiyle pişirilen ürünlerde daha düşük lipid oksidasyonu ve protein denatürasyonu sonuçlarına ulaşılmıştır (Del Pulgar vd., 2012).

2.2. Sous Vide Yönteminin Et Türlerine Uygulanması ve Literatürdeki Bulgular

Bu pişirme yöntemi büyükbaş ve küçükbaş hayvanlarda daha çok bonfile, sırt, pirzola ve içkembeye uygulanırken; kanatlı hayvanlarda göğüs, but, kanat ve ciğere, balıklarda ise filetolara uygulanmaktadır. Bu yöntemle pişirilen etli yemekler de bulunmaktadır (Nyati, 2000). Geleneksel yöntem ile pişirilen

etlerde, çok yaşı veya genç yağsız hayvanların etleri genellikle kuru, tatsız ve sert sonuçlar verebilmektedir. Sous vide yöntemi ile pişirilen etler, geleneksel pişirme yöntemine göre daha sulu, yumuşak ve lezzetli sonuçlar verir. Etteki tat, aroma, yumuşaklık vb. özellikleri en iyi şekilde koruyabilmek ve pişirme kayıplarını en aza indirmek için sous vide diğer pişirme yöntemlerine göre daha uygun ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntemle etin nem ve aroma bileşenlerinde kayıplar meydana gelmeden mikrobiyolojik riskler de en aza indirilerek ürünlerin raf ömrünün uzaması sağlanabilmektedir (Baldwin, 2012).

Geleneksel pişirme yöntemiyle pişirilen et veya tavuk ürünlerinde ısı işlem uygulanırken ısı, ürünün her bölgesine eşit miktarda uygulanmadığından oluşabilen renk kusurları sous vide tekniğinde görülmez. Bunun en büyük sebebi, sous vide yönteminin ısıyı dengeli ve eşit miktarda ürünün tüm yüzeyine uygulamasıdır (Babür vd., 2019; Kerdpiroon vd., 2019). Bu modern yöntem iyi bir bariyer görevi görerek et, tavuk ve balık gibi yüksek suluk ve nem beklenen gıdalarda hava ile temasını keserek nemin buharlaşmasını önler; nem bu sayede vakumlu ambalaj içerisinde kalır. Fırınlama, kızartma, kavurma veya haşlama gibi geleneksel pişirme yöntemleriyle kıyaslandığında, servis edilmeye ve tüketilmeye hazır yüksek kaliteli ürün elde etmek için sous vide daha avantajlıdır (Silva vd., 2016).

Modern sous vide yöntemiyle diğer pişirme yöntemlerine kıyasla daha yüksek oranda vitamin ve mineralin korunduğu bilinmektedir. Bunun sebebi, vakumlu ve ısıya dayanıklı poşetlerde pişirilmesi esnasında ısı ile gıda arasındaki direkt temasın engellenmesidir. Sous vide yöntemiyle işlenmiş et ve et ürünleri pişirilirken, düşük sıcaklıkta pişen ürün ile yüksek sıcaklıkta pişen ürün arasında mineral ve pişirme kaybı bakımından fark oluşur. Düşük sıcaklıkta pişen ürünler, daha düşük pişirme kaybına ve daha yüksek mineral değerlerine sahip olur (Silva vd., 2017; Cui vd., 2021). Başka bir çalışmada, haşlama ve sous vide tekniği kıyaslanarak yapılan bir tavuk göğsü örneğinde su tutma kapasitesi bakımından sous vide pişirme yöntemi haşlamaya göre daha yüksek sululuk ile sonuçlanmıştır. Sous vide yöntemi kendi içerisinde derecelendirildiğinde, ısının ve sürenin artması çevresel basınçtan kaynaklı olarak pişirme kayıplarının artmasına sebep olur (Gluchowski vd., 2020). Sous vide yöntemi ile pişirilmiş tavuk göğsü fileto örneğinde 55 °C, 58 °C ve 61 °C’de pişirildiğinde pişirme kayıpları %9,33–14,09 aralığında görülmüştür (Karpínska-Tymoszczyk vd., 2020). Sous vide yöntemiyle 63 ve 65 °C’de 60 dakika işlenmiş bir tavuk örneğinde, geleneksel pişirme yöntemlerine göre kayıp miktarı %25,7’den %6,5’e düşmüştür (Soletska ve Krasota, 2017). Bu çalışmalar, pişirme kayıpları bakımından ele alındığında sous vide yönteminin önemini ortaya koymaktadır.

Sous vide uygulamalarında pişirme öncesinde gerçekleştirilen salamura ve marinasyon işlemleri, ürün kalitesi üzerinde tamamlayıcı bir etki oluşturmaktadır. Vakumlu poşet içerisine eklenen baharat, sıvı veya yağ bazlı marinasyon bileşenlerinin ürünle sürekli ve doğrudan temas halinde kalması,

geleneksel marinasyon yöntemlerine kıyasla aroma geçişinin daha etkin gerçekleşmesini sağlamaktadır (Yıkılmış vd., 2018).

Tablo 1

Sous Vide Pişirme Yönteminin Et Ürünlerine Etkisine İlişkin Çalışma Örnekleri

Örnek	Piştirme koşulu	Kalite değerlendirmesi	Sonuç	Kaynakça
Tavuk göğsü	60 ve 70 °C'de 45, 90 ve 135 dakika	Piştirme kaybı, jelleşme ve gıda kimyası	Farklı sıcaklık ve zaman ile tuzlu su işlemi kombinasyonlarının sertliği ve esnekliği etkilediği, fakat yapışmayı etkilemediği belirlenmiştir. Tavuk göğüslerinde sıcaklık ve zaman arttıkça piştirme kayıplarında artış yaşanmıştır. Tavuk göğsüne uygulanan salamura glutamik asit kaybını azaltmıştır. Salamura işlemi aynı zamanda glutamik, alanin ve glisin asitleri gibi aroma özellikleri ile serbest amino asitlerin korunmasında da etkili olmuştur.	Nyam vd. (2023)
Tavuk nugget	Derin yağda kızartma, mikrodalga, fırın ve sous vide yöntemleri ile piştirim	Akrilamid ve HMF değerleri	Sous vide ile pişirilmiş nugget örneklerinde sıcaklık yeterince yüksek olmadığı için akrilamid rastlanmamıştır. SV tekniği, diğer piştirme yöntemlerine kıyasla glütensiz unların kullanıldığı tüm örneklerde daha düşük 5-hidroksimetil furfural değerine sahiptir. Chia ununun tavuk nugget üretiminde bir bileşen olarak kullanılmasının, muhtemel akrilamid ve 5-hidroksimetil furfural değerlerini en aza indirebileceğini göstermektedir.	Ateş ve Unal (2023)
Tavuk göğsü	50 ve 60 °C'de 120 ile 180 dakika arasında tek ve iki aşamalı piştirim	Kesme kuvveti ve lipid oksidasyon	İki aşamalı sous vide tekniği, ana doku parametresi olan kesme kuvvetini, sertliği, çiğnenebilirliği ve yapışkanlığı azaltmış; ancak su içeriğini, kızarıklığı ve oksidatif stabiliteyi korumuştur. Ayrıca, iki aşamalı sous vide ile pişirilen tavuk göğsünde, geleneksel tek aşamalı sous vide ile pişirilenlere kıyasla daha düşük lipid oksidasyon gözlemlenmiştir.	Hasani vd. (2022)
Tavuk göğsü	65 °C'de 24 dakika	Renk, duyuşal özellikler ve mikrobiyolojik özellikler	Diğer piştirme yöntemlerine kıyasla sous vide yöntemi kullanılarak hazırlanan örnekler, nispeten daha düşük doymuş yağ asitleri (SFA) içeriğine sahipken çiğ etteki içeriklere kıyasla daha yüksek oranda doymamış yağ asitleri (MUFA ve PUFA) içermektedir. Sous vide piştirme	Kowalska vd. (2023)

			yönteminde en düşük esmerleşme ve en yüksek sululuk gözlemlenmiştir.	
Ördek göğsü	65 ve 70 °C'de 90 dk.	Piştirme kaybı, jelleşme, depolama ve duyuşal özellikler	Sous vide, haşlama, tavada kızartma ve kavurmaya göre daha düşük piştirme kaybı ve daha yüksek su tutma kapasitesiyle sonuçlanmıştır. Sous vide ile pişirilen ördek göğsü, diğer piştirme tekniklerine göre daha yüksek yapışkanlık, çiğnenebilirlik ve esnekliğe sahip olmuştur. Piştirme sonrasında 4 °C'de saklanan sous vide örnekleri, 7 gün içinde saptanabilir mikroorganizma içermemesi ve değişmeyen fizikokimyasal özellikleri nedeniyle tüketim için güvenli sonuçlar vermiştir.	Chang vd. (2023)
Kaz eti	70 °C'de 4 saat	Mineral değerleri	Her iki tür kaz etinde (derili ve derisiz), ısı işlem yöntemlerinden mikrodalga (M), sous vide (SV) ve güveç (S), besin içeriklerini, mineral konsantrasyonlarını ve tutma katsayılarını önemli ölçüde etkilemiştir. Diyet perspektifinden bakıldığında, derisiz kaz etinin SV yöntemi ile pişirilmesi en faydalı olmaktadır. SV yöntemi, diğer piştirme yöntemlerine kıyasla minerallerin kaybedilmeme oranı daha yüksektir.	Wereńska vd. (2022)
Dana incik	2, 5, 8, 12 ve 24 saat süreyle 55, 65 ve 75 °C'de	Renk, duyuşal özellikler ve amino asit	Piştirme sıcaklığındaki artış, dana inciklerin renk yoğunluğunu ve yumuşaklığını arttırırken çiğnenebilirliği ve sululuğu azaltmıştır. 65 ve 75 °C'deki işlemlerde, hidroksiprolin oranında piştirme süresinin artmasıyla önemli bir artış gerçekleşmiştir.	Gámbaro vd. (2023)
Domuz biftek	60 °C'de 4 saat	Renk, piştirme kaybı, duyuşal özellikler ve lipid oksidasyon	Sous vide ile pişirilmiş et numuneleri, diğer numunelere kıyasla yumuşaklık ve sululuk için daha yüksek duyuşal puan almış ve daha az piştirme kaybı yaşanmıştır. Sous vide ile pişirilen et örnekleri daha iyi kalite ve renk özellikleri gösterirken daha az oksidasyon sağlamıştır.	Song vd. (2022)
Arap devesi	70, 80, 90 ve 100 °C'de 30, 60, 90, 120, 150 ve 180 dakika	Renk ve piştirme kaybı	Sous vide yöntemiyle pişirilen deve eti, elektrikli fırında pişirilene göre önemli ölçüde daha yüksek yoğunluğa ve daha düşük piştirme kaybına sahip olmuştur. SV ile piştirme sıcaklığı arttıkça pH, piştirme kaybı ve sarılık artmıştır.	Hobani vd. (2023)

Dana bonfile	54 °C'de 0–24 saat arası pişirim	Mikrobiyolojik analiz	Sous vide işlemi, 54 °C'de 9 saat sonra Escherichia coli ve mezofilik bakteri popülasyonunu önemli ölçüde azaltmış ve ürünü güvenilir hale getirmiştir.	Ferigolo vd. (2021)
Kuzu eti	75 °C'de 35 dakika	Renk, lipid oksidasyon ve mikrobiyolojik analiz	SV pişirme, ızgara köftelere kıyasla yüksek oranda peroksit olabildiği çoklu doymamış yağ asitlerinin daha büyük bir oranını gösteren tiyobarbitürik asit reaktif maddelerin (TBARS) ve oksisterollerin oluşumunu engellemiştir. SV pişirme daha açık bir yüzey rengi sağlayarak lipid ve kolesterol oksidasyon bileşiklerinin oluşumunu engeller.	Ortuño vd. (2021)

Not. Kaynak: Nyam vd. (2023); Ateş ve Unal (2023); Hasani vd. (2022); Kowalska vd. (2023); Chang vd. (2023); Wereńska vd. (2022); Gámbaro vd. (2023); Song vd. (2022); Hobani vd. (2023); Ferigolo vd. (2021); Ortuño vd. (2021).

Tablo 1’de görüldüğü üzere sous vide yöntemi; duyu özellikler, renk, lipid oksidasyon, mineral içeriği, pişirme kaybı ve depolama süresi bakımından diğer pişirme yöntemlerine kıyasla olumlu yönde farklılaşmaktadır. Hasani vd. (2022) çalışmasında, iki aşamalı olarak 50 ve 60 °C’de pişirilen tavuk örneğinde, genel olarak tek aşamalı şekilde pişirilen tavuk örneklerinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. İki aşamalı pişirme; renk, sakızimsılık ve tiyobarbitürik asit reaktif maddeler (TBARS) üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Tek aşamalı pişirmeye göre iki aşamalı pişirmede daha düşük pişirme kaybı ve artan protein çözünürlüğü değerlerine ulaşılmıştır. Aynı toplam pişirme süresine tabi tutulan tavuk göğsü örneklerinde, iki adımlı pişirme yöntemi tek adımlı pişirme yöntemine göre daha yüksek pastörizasyon ve TBA değerine sahip olmuştur.

2.3. Renk Özellikleri Üzerine Etkisi

Sous vide pişirme yöntemi, ızgara ve fırınlamaya kıyasla kırmızı et ve kanatlı hayvan türlerinde daha düşük esmerleşmeyle sonuçlanmaktadır. Kaslarda miyogloblin sızıntısı gerçekleşmesiyle pembe renk oluşur. Tüketiciler genellikle etin pembe rengini veya içerisinden akan kanı pişmemiş bir et olarak görüp bunu bir kusur olarak değerlendirmektedir (Kieffer vd., 2000). Hobani vd. (2023), Kowalska vd. (2023) ve Ortuño vd. (2021) çalışmalarından alınan sonuçlara göre de sous vide yöntemi, fırınlama, kızartma ve ızgara pişirme yöntemlerine göre en düşük esmerleşme değerini vermiştir. Bu durumun en temel sebeplerinden bir tanesi, vakumlu paket içerisinde pişen et örneklerinde suyun buharlaşmasının engellenerek nem ve su oranı yüksek bir ortamda pişmenin sağlanmasıdır.

2.4. Mikrobiyolojik Güvenlik ve Raf Ömrü

Sous vide pişirme yönteminde gıda güvenliği açısından en kritik konulardan biri, vakumlu ve oksijensiz ortamda gelişebilen anaerobik patojenlerin, özellikle *Clostridium botulinum* sporlarının kontrolüdür.

Clostridium botulinum sporları, oksijenin bulunmadığı vakumlu ambalaj ortamında, eğer pişirme sıcaklığı ve süresi yetersiz kalırsa filizlenerek toksin üretebilir. Bu nedenle sous vide uygulamalarında ‘düşük sıcaklık–uzun süre’ prensibi, sporların inaktivasyonu için yeterli ısı işlem süresinin (pastörizasyon eşdeğerliğinin) sağlanmasıyla birlikte uygulanmalıdır. Giriş bölümünde de belirtildiği üzere, sous vide ile pişirilen ürünlerde tespit edilebilen patojenler arasında *Clostridium botulinum* yer almaktadır (Stringer ve Metris, 2018). Bu açıdan, sous vide yönteminin mikrobiyal güvenliği yalnızca toplam mezofilik ve *Enterobacteriaceae* yükünün azaltılmasıyla değil, aynı zamanda anaerobik sporlu patojenlerin kontrolüyle de değerlendirilmelidir. Sebzipelerde de benzer şekilde, 55 °C gibi düşük sıcaklıklarda yapılan sous vide uygulamalarının ürünlerin uzun süre depolanabilmesini garanti etmediği belirtilmektedir (Kathuria vd., 2022); bu durum, et ürünleri için de geçerli bir uyarı niteliğindedir ve sıcaklık–süre kombinasyonlarının ürüne özgü olarak titizlikle belirlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sous vide yöntemi, mikrobiyal güvenlik başlığı altında değerlendirildiğinde olumlu sonuçlar vermesi bu yöntemin verimliliğini arttırmaktadır. Et örneklerinde, etin pişirilme süresi et ürününün türüne göre değişiklik göstermekle beraber, sous vide yönteminde 60 °C’ye kadar olan ısı patojenlerin ölümü için yeterlidir. Mikrobiyolojik risk açısından ele alındığında, düşük sıcaklıkta uzun süre pişirmek pişirilen örneği daha güvenilir hale getirir. Et ve et ürünlerinde genellikle bozulmaya etkili olan *Listeria*, *E. coli* ve mezofilik bakterilerin sayısını azaltmak için sous vide yönteminde en uygun aralık 65 °C’de 45 dakika boyunca pişirmektir. Farklı sıcaklık ve zaman kombinasyonlarında 65, 70 ve 75 °C’de 20, 40 ve 60 dakika sous vide uygulaması, toplam mezofilik, *Enterobacteriaceae* ve *E. coli* sayısını önemli ölçüde azaltmıştır (Bıyıklı vd., 2020). Et ürünlerinin düşük sıcaklıkta pişirilmesi gerektiği durumlarda mikrobiyolojik açıdan güvenilir hale gelmesi, uzun süre pişirilmesine bağlıdır. Ferigolo vd. (2021) çalışmasında, 54,5 °C’de 9 saat sonra dana bonfilelerin *E. coli* ve mezofilik bakteri popülasyonunun önemli ölçüde azaldığı ve ürünün güvenilir hale geldiği gözlemlenmiştir.

Bu bakterilerin et ürünlerinin bozulmasında önemli ölçüde etkili olduğu, bu bakterilerin azalması durumunda ise ürünlerin raf ömrünün uzayabildiği görülmektedir. Sous vide yöntemi mikrobiyolojik açıdan güvenilirlik sağladığı gibi, raf ömrünü uzatmada da diğer pişirme yöntemlerine göre önemli farklılıklar göstermektedir. Günümüz dünyasında pişirilen ürünleri uygun koşullarda saklayarak daha sonra tekrar tüketmek büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Bu teknikle önemli gıda kayıplarının ve israfın önüne geçmek mümkündür. Sous vide yöntemi ile pişen et örnekleri, çiğ etten daha uzun raf ömrüne sahip olmuştur. Diğer pişirme yöntemleriyle de pişirilen tavuk göğsü örneklerinin 7 günlük

depolama süresi boyunca mikrobiyolojik kalite bakımından değerlendirilmesinde, sous vide yöntemiyle pişen tavuk göğsü örnekleri depolama süresi boyunca daha güvenilir sonuçlar vermiştir (Kowalska vd., 2023). Bu modern pişirme tekniğiyle et ve et ürünleri, vakumlu ve ısıya dayanıklı paketler içerisinde anaerobik ve aerobik bozulmaya sebep olan mikroorganizmaların çoğalması engellenir ve donmuş gıdalarda oluşabilecek kontaminasyonun önüne geçilerek depolama ve raf ömrü uzatılır (Kehlet vd., 2017; Stringer ve Metris, 2018).

Et ve et ürünlerinin raf ömrü göz önünde bulundurulduğunda, ısıl işlem uygulanıp ardından soğutularak dondurulması durumunda yeterli ısıl işlem görüp uygun sıcaklıkta depolamanın önemiyle beraber doğru vakumlu paketleme de önemlidir. Haghighi vd. (2021) çalışmasında, 60 °C’de 60 dakika pişen tavuk göğsünün 4 °C’de 21 gün depolanması durumunda dahi psikrotrofik bakteri ve Enterobacteriaceae mikrobiyal grupları tespit edilememiştir. Bu modern pişirme yöntemi, tüketicilere uzun raf ömrüyle beraber mikrobiyal güvenliğin de sağlandığını göstermektedir.

2.5. Pişirme Kaybı, Su Tutma Kapasitesi ve Mineral İçeriği

Sous vide yönteminin diğer kalite değerleri bakımından karşılaştırılmasında pişirme kaybı en çok etkilenen faktör olmuştur. Pişirme kaybında, et ve et ürünleri ısıl işlem görürken ürünlerden çıkan sıvı ile birlikte kayıplar oluşur. Bu yöntem, geleneksel pişirme yöntemlerine göre oldukça daha yüksek su tutma özelliğine sahiptir (Botinestean vd., 2016). Sous vide tekniğiyle pişirilmeden önce 2 saat 3 °C’de salamura edilen tavuk göğüsleri, genel olarak az miktarda olsa da pişirme kaybını azaltmıştır. Sıcaklık ve süre, et ve et ürünlerinde pişirme kaybını önemli ölçüde etkilemektedir. Tavuk göğsü örneklerinde 135 dakika pişirilen örnek ile 45 dakika pişirilen örnek karşılaştırıldığında, daha uzun süre pişirilenler daha fazla pişirme kaybına sebep olmuştur (Nyam vd., 2023). Diğer bir çalışmada, Chang vd. (2023), 65 °C ile 70 °C arasında pişirilmiş örnekleri kıyaslamış ve 70 °C’de daha yüksek pişirme kaybı ile sonuçlanmıştır.

Pişirme kayıplarının düzeyi, ürünün pişirildiği sıcaklık ve zamanla ilişkili olduğu gibi, bu durumdan etkilenen et proteini ve denatürasyonun aşamaları da pişirme kaybını etkilemektedir. Bu kayıplar temel olarak miyofibriller proteinlerin büzülmesi 40 ve 60 °C arasında, kolajenin büzülmesi 60 ve 70 °C arasında, aktinin denatürasyonu ise 70 ve 80 °C arasında gerçekleşmektedir (Haghighi vd., 2021). Tavuk göğsünün 60 °C’de 1 saat pişirilmesi, 2 ve 3 saat süreyle pişirilenlere kıyaslandığında %6,58 daha düşük pişirme kaybıyla sonuçlanmıştır (Park vd., 2020). Tüketiciler ve işletmeler için büyük önem arz eden et ve et ürünlerinin suluğu ele alındığında, sous vide yöntemiyle pişirme kaybını en aza indirmek için sıcaklık ve süreyi düşük seviyede tutmak ve bunu etin türüne göre ayarlamak oldukça önemlidir.

Wereńska vd. (2022) çalışmasında, kaz etinin türü (derili ve derisiz) ve pişirme yöntemi (sous vide, güveçte ve mikrodalga) etin kolesterol içeriğini etkilemiştir. Derili kaz eti örneği pişirme yöntemleri ile kıyaslandığında, protein, yağ, kolesterol, çinko ve sodyum tutma katsayıları bakımından derili kaz eti için en uygun pişirme yöntemi güveçte pişirme olmuştur. Sous vide yöntemi ile pişen kaz eti örneklerinde magnezyum, kalsiyum ve çinko minerallerinin değişimleri büyük ölçüde sıcaklığa ve süreye göre değişmektedir. Sous vide yöntemiyle kaz etinde yer alan magnezyum, sodyum, kalsiyum, demir ve çinko minerallerinin en yüksek tutma oranı 55 °C’de kaydedilmiştir. Diyet yapanlar için derisiz kaz etini sous vide yöntemiyle pişirmek diğer pişirme yöntemlerine göre en faydalı olanıdır; bu yöntem, en yüksek magnezyum, kalsiyum ve potasyum tutma özelliğini göstermiştir.

3. SOUS VIDE PİŞİRME YÖNTEMİNİN SEBZELER ÜZERİNE ETKİSİ

3.1. Sebzelerin Besinsel Özellikleri ve Pişirme Yöntemlerinin Etkisi

Meyve ve sebzelerin tüketimi, insan sağlığı üzerinde birçok olumlu etkiye sahip olmakla beraber içerisinde C, E ve K gibi birçok vitamin yer almakta; ayrıca karotenoidler ve fenolik maddeler gibi antioksidanları da içermektedir (Kaur ve Kapoor, 2001). Sebzelerde bulunan antioksidan maddelerin içeriği, topraktan masaya gelinceye kadar bütün işlem basamaklarına göre değişiklik gösterebilir (Danesi ve Bordoni, 2008). Çiğ veya işlenmiş olan meyve ve sebzeler, bazı hastalıklara karşı koruyucu etki göstermeleri sebebiyle günlük tüketimimizde yer almalıdır. Sebzelerde ve meyvelerde bulunan antioksidanlar, vücutta bulunan oksidatif stresi etkisiz hale getirmede önemli bir araçtır. Oksidatif zararı engelleyen antioksidanlar; diyabet, kanser ve kalp hastalıklarını önlemede önemli bir etkidir (Podsedeck, 2007).

Meyveler genel olarak çiğ olarak tüketilmektedir. Sebzelerin pişirilmesi durumunda ise nişastanın jelatinleşmesi gerçekleşir ve bu durum pektik maddelerin yumuşamasına/çözünürlüğünün artmasına neden olarak vücuttaki lif sindirilebilirliğini arttırmaktadır. Sebzelerin pişirilmesi durumunda hücre duvarları zarar görür ve bu durum besin değerlerinin azalmasına sebep olur. Besin değerlerinin korunmasını sağlamak ve bu zararları en aza indirmek önemli ölçüde pişirme yöntemine bağlıdır (Kathuria vd., 2022). Sebzeleri pişirmede en yaygın şekilde kullanılan yöntemler haşlama ve buharda pişirme yöntemidir. Bu geleneksel yöntemler zengin besin değerlerinin kaybedilmesine sebep olmaktadır (Dos Reis vd., 2015). Sebzelerin haşlama, buharda ve mikrodalgada pişirilmesi durumunda hücre duvarları ısıdan zarar görerek sebzelerin su ve besinsel değerlerini kaybetmesine sebep olur (Charley ve Weaver, 1998). Geleneksel yöntemlere karşı modern sous vide tekniği, sebzeleri pişirmede hücre duvarlarına zarar vermeyerek daha iyi pişmesini ve patojenlerden arınmasını sağlayarak besinsel değerleri korur (Creed, 1995; Schellekens, 1996).

3.2. Fenolik Bileşikler, Vitamin İçeriği ve Antioksidan Aktivite

Sous vide yöntemi diğer yöntemlere göre kıyaslandığında, C vitamini, folat ve B6 vitamininde meydana gelen kayıpları azaltarak antosiyanin içeriğini koruması önemli bir faktördür. Sous vide yöntemi, sebzelerde koku ve tat gibi duyuşal özellikleri koruması bakımından ve pişirme kaybını en aza indirmede diğer yöntemlere göre daha etkilidir. Bu yöntemle sebzelerin genellikle 80 °C'nin üzerinde pişirilmesi önerilir; çünkü bu sıcaklık seviyesinde hücre duvarları bozulmadan lif ve pektin yumuşaması gerçekleşerek patojenlerin ölümü gerçekleşir ve daha sağlıklı ürünler elde edilir (Sila vd., 2006). Nişasta bakımından zengin sebzelerin ise 80 °C'nin altında pişirilmesi gerekmektedir; bunun sebebi, sebzelerin içerisindeki nişasta granüllerinin jelatinleşmeye yol açabilmesidir (García-Segovia vd., 2008).

Sebzelerin sous vide yöntemiyle pişirilmesi durumunda sebze de bulunan toplam fenolik miktarı, pişirme derecesine ve süresine göre değişiklik gösterebilmektedir. Brokoli üzerine yapılan bir çalışmada, sous vide yöntemi ile pişirim sağlanan brokoli örneklerinde toplam fenolik madde miktarı çiğ brokoliye oranla daha yüksek çıkmıştır (Martínez-Hernández vd., 2013). Başka bir çalışmada havuç örnekleri buharda ve sous vide yöntemi ile kıyaslandığında, buharda pişirmenin fenolik bileşiklerin yapısını olumsuz yönde etkilediği; sous vide pişirme yönteminin ise bu bileşikler ve orijinal çiğ havuç aromasını koruduğu gözlemlenmiştir (Chiavaro vd., 2012). Bitkisel ürünlerde 42-49 °C sıcaklık aralığında üreyebilen patojenik bakterilerin yanı sıra 50-55 °C arasında yavaş üreyebilen termofilik bakteriler bulunmaktadır. Sebzelerin bozulmasına sebep olan en yaygın mikroorganizmalar;

Clostridium botulinum, *E. coli*, *Campylobacter jejuni*, *Bacillus cereus*, *Salmonella* vb.'dir. Bu yüzden sebzelerin sous vide yöntemiyle 55 °C'de pişirilmesi, ürünlerin daha uzun süre depolanabilmesini garanti etmez (Kathuria vd., 2022). Tüketicilerin satın alma davranışını belirleyen önemli etkenlerden biri de renktir. Karotenoid bileşikler birçok sebze ve meyvede bulunmaktadır. Bu bileşikler sarı, kırmızı ve turuncu renkteki pigmentlerdir. Meyve ve sebzelere uygulanan ısı işlemi, karotenoid konsantrasyonunu arttırmaktadır (Podsedeck, 2007). Pişirilen meyve ve sebzelerin toplam karotenoid miktarı, sebze ve meyvenin türüne ve pişirme koşullarına göre değişiklik göstermektedir.

Tablo 2**Sous Vide Pişirme Yönteminin Sebze Ürünlerine Etkisine İlişkin Çalışma Örnekleri**

Örnek	Piştirme Koşulu	Kalite değerlendirmesi	Sonuç	Kaynakça
Patlıcan ve Kabak	90 °C’de 15, 30 ve 45 dakika	Çiğneme ve duyuusal analiz	Sous vide, buharda pişirmeye kıyasla daha koyu ve daha kahverengi patlıcan eti ile sonuçlanırken kabak için tersi olmuştur. Kabuğun rengi ile ilgili olarak her iki piştirme yöntemi de patlıcanı eşit derecede etkilemiş, ancak sous vide kabaklara daha açık, daha beyaz ve daha az yeşil bir renk vermiştir. Sous vide, mekanik parametrelerle ilgili olarak her zaman daha sıkı örnekler vermiş; bu durum daha fazla çiğnemeyi gerektirebilmektedir.	Ilic vd. (2023)
Brokoli, Taze Fasulye ve Pancar	Brokoli 85 °C’de 30 ve 45 dakika; taze fasulye 85 °C’de 30, 60, 90 dakika; pancar 85 °C’de 45, 90, 180 dakika	Mineral özellikler ve renk	Sous vide yöntemi, uzun piştirme süresinden sonra bile magnezyum, sodyum, potasyum, fosfor veya kalsiyum düşüşüne neden olmamıştır. Yapılan bu çalışmada SV ile renk kayıplarının azaldığı kanıtlanmıştır. Sous vide işleminde sonra örneklerin daha yoğun tat ve aromaya sahip olduğu ortaya çıkmıştır.	Czarnowska-Kujawska vd. (2023)
Kabak ve Yeşil Fasulye	Kabak 90 °C’de 45 dakika; fasulye 90 °C’de 60 dakika	Toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite	Toplam fenolik madde miktarında ve antioksidan aktivitede çoğunlukla azalma meydana geldiği görülmüştür. Toplam fenolik madde miktarındaki en az kaybın sous vide yönteminde olduğu belirlenmiştir. Kabak örneğinde haşlama yöntemi, fasulye örneğinde ise buharda piştirme yöntemi, antioksidan kapasitenin diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir.	Yılmaz ve İlyasoğlu (2023)
Kereviz	90 °C’de 15, 30, 45 dakika	Mekanik özellikler	Sous vide ile pişen kerevizin sıklığı, piştirme süresine bakılmaksızın korunmuştur. Haşlama ve buharda piştirme yönteminde süre uzadıkça kerevizin sıklığında azalmalar meydana gelmiştir. Piştirme kaybı diğer yöntemlere göre en az sous vide yönteminde ölçülmüştür. Sous vide ile elde edilen kereviz, kaynatma	Ilic vd. (2021)

			ve buharlamaya kıyasla iki kat daha fazla çığneme gerektirmiştir.	
Fesleğen	65, 75, 85 °C'de 60 dakika	Duyusal özellikler	Koku ve lezzet profili üzerinde sous vide pişirme sıcaklığı önemli bir etki göstermemiştir. Sous vide yöntemi, geleneksel pişirme yöntemine göre fesleğenin tat ve aromasını daha iyi korumuştur. Yüksek sıcaklık ve uzun pişirme süresi, aroma bileşiminde farklılığa sebep olmuştur.	Głuchowski vd. (2022)

Not. Kaynak: Ilıc vd. (2023); Czarnowska-Kujawska vd. (2023); Yılmaz ve İlyasoğlu (2023); Ilıc vd. (2021); Głuchowski vd. (2022).

3.3. Renk ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkiler

İnsan sağlığında meyve ve sebze tüketimi büyük bir öneme sahiptir. Vitamin, mineral, polifenoller ve diyet lifi gibi zengin besin içerikleriyle her biri farklı düzeyde insan sağlığına katkıda bulunur (Slavin ve Lloyd, 2012). Yeterli meyve ve sebze tüketimi sağlandığında, kalp hastalıkları, kanser, inme, katarakt, Alzheimer ve kronik hastalıkların önlenmesinde önemli rol oynar (Willett, 2002; Liu, 2004). Sebze ve meyvelerde bulunan antioksidanlar kan basıncını veya kan şekerini dengeleyerek bağışıklık sistemini güçlendirir ve kolesterolü düşürerek insan sağlığının korunmasını sağlar (Podsedek, 2007; Slavin ve Lloyd, 2012). Sebze ve meyvelerin büyük önem taşıdığı vitamin, mineral vb. bileşenler, farklı pişirme yöntemleriyle sebzelerden alacağımız besin değeri, tat ve görünüm gibi farklı kalite özelliklerini etkilemektedir.

Sous vide pişirme yöntemiyle işlenmiş sebzeler ele alındığında, Yılmaz ve İlyasoğlu (2023) çalışmasında sebzelerde bulunan toplam fenolik madde miktarı (TFM) buharda, kaynatma ve sous vide pişirme yöntemleriyle kıyaslandığında, sous vide yönteminin içeriği en iyi koruyan yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre kabak örneğinin antioksidan kapasitesinde genel olarak artış görülmüş, fasulye örneklerinde ise antioksidan kapasitesinde azalma görülmüştür. Pişirme süresindeki artışlar, sebzelerdeki antioksidan özelliğinin artmasını sağlayabilmektedir. Amoroso vd. (2019) çalışmasında da sous vide pişirme yöntemi, kaynama ve buharda pişirme yöntemlerine kıyasla Brassica sebzeleri için fenolik bileşiklerin tutulması bakımından en uygun yöntem olmuştur.

Kabak örneğinde haşlama, fasulye örneğinde ise buharda pişirme yöntemi, antioksidan kapasite bakımından diğer pişirme yöntemlerine kıyasla daha yüksek sonuç vermiştir. Tüm parametreler ele alındığında, kabak için sous vide yöntemi, yeşil fasulye için ise buharda pişirme yöntemi önerilmiştir (Yılmaz ve İlyasoğlu, 2023). Sebzelerde pişirme süresinin uzaması renk bozulmalarına sebep olarak gıdaların görünümünde önemli bir etkiye sahip olur. Ilıc vd. (2023) çalışmasında

buharda ve sous vide pişirme yöntemleri kabak ve patlıcan üzerinde değerlendirilmiş; bu çalışma sonucunda patlıcan örneğinin kabuk rengi üzerinde her iki yöntemin eşit etkilere sahip olduğu, kabakta ise sous vide yönteminin daha beyaz, daha açık ve daha düşük yeşillikte bir renk sağladığı belirlenmiştir. Pişirme süresinin uzaması, kabak ve patlıcanın renginde solmalara sebep olmuştur.

Yılmaz ve İlyasoğlu (2023) çalışmasında ise pişirme işlemlerinden sonra parlaklık değerlerinde düşüş, kırmızılık ve yeşillik değerlerinde artış yaşanmıştır. Sous vide pişirme yöntemi, geleneksel pişirme yöntemlerine kıyaslandığında haşlamaya göre rengi daha iyi korumuş; yeşil fasulye örneği için ise iki pişirme yöntemi arasında önemli farklılıkların olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Czarnowska-Kujawska vd. (2023) çalışmasında, yeşil fasulye örneği için sous vide işleme süresi ne kadar uzun olursa yeşil fasulyenin rengi de o kadar yoğunlaşmıştır. Uzun pişirme süresi, pancar ve brokolinin renkleri üzerinde tam tersi bir etki göstermiş; pişirme süresi arttıkça renk yoğunluğunda azalma meydana gelmiştir. Yukarıda verilen sebze örneklerinin tamamında, pişirme süresi arttıkça sebzelerde daha fazla yumuşama meydana gelmiştir.

Ilic vd. (2023) çalışmasında, sous vide ve buharda pişirme yöntemleri çiğneme sayısı ve tüketim süresi olarak karşılaştırıldığında, sous vide pişirme yöntemi daha diri sonuçlar vererek çiğneme sayısında artışa ve tüketim süresinin uzamasına neden olmuştur. Ilic vd. (2021) çalışmasında da bu bilgileri destekleyen sonuçlar elde edilmiştir. Kaynatma, sous vide ve buharda pişirme yöntemleri kereviz örnekleri üzerinde çiğneme sayısı bakımından karşılaştırıldığında, kaynatma ve buharda pişirme benzer sonuçlar vermiş; sous vide yöntemi ise diğer iki yöntemle göre farklı sonuçlar vermiştir. Sous vide ile pişirilen kerevizler, diğer pişirme yöntemlerine kıyasla iki kat daha fazla çiğneme çabası gerektirmektedir. Czarnowska-Kujawska vd. (2023) çalışmasında, sebzelerin insan sağlığındaki yerini vurgulayarak sous vide yönteminin brokoli, yeşil fasulye ve pancar örneklerinde magnezyum, potasyum, sodyum, kalsiyum ve fosfor gibi önemli minerallerin kaybına sebep olmadığı belirtilmiştir. Gluchowski vd. (2022) örneğinde ise daha uzun ve yüksek ısıda fesleğen infüzyonu aromasında belirgin şekilde değişikliğe sebep olunmuştur. Sous vide yöntemiyle 65 °C’de pişirilen fesleğen infüzyonları, geleneksel demleme yöntemiyle demlenmiş infüzyonlara benzer sonuçlar vermiştir. Et ve sebzelerde sous vide yöntemi geleneksel yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verse de fesleğen infüzyonunda böyle bir sonuca ulaşılmamıştır.

4. SOUS VIDE YÖNTEMİYLE PİŞİRMENİN AVANTAJLARI

Sous vide yöntemi, geniş kullanım alanıyla gıdaların fiziksel, kimyasal ve duyu kalitesinin korunmasında kullanılabilecek bir pişirme yöntemidir. Sous vide pişirme yönteminde vakumlu paketleme, hava ile temasını keserek su ile arasında bariyer görevi görür; bu sayede ısı, gıdanın tüm yüzeyine temas ederek

daha verimli ısı transferi gerçekleşir. Kontrol edilebilir sıcaklık ve vakumlu paket, içerisindeki ürünün pişirme esnasında nem kaybını engelleyerek gıdanın su kaybetmemesini sağlar (Silva vd., 2016). Kontrollü sıcaklık sayesinde, duyuşal ve besleyici özelliklerini kaybetmeden her zaman tekrarlanabilir ve mükemmel sonuçlar elde edilebilir.

B ve C gibi ısıya duyarlı vitaminler, amino asitler ve mineraller geleneksel pişirme yöntemleriyle değerlerinde düşüş gösterebilmektedir. Kontrollü ve düşük ısıda pişirme sayesinde besin değerleri korunabilmektedir (Thathsarani vd., 2022). Sous vide ile pişirilen ürünlerde daha düşük lipid oksidasyonu ve protein oksidasyonu sonuçlarına ulaşılır; bu sayede aerobik bakteriler azaltılarak pişirim ve sonrasında depolamada oluşabilecek kontaminasyon riskleri azaltılarak uzun raf ömrü sağlanır (Bhuyan vd., 2022). Deniz ürünleri, kanatlı hayvanlar, sebzeler ve etlere uygulanabilirliği bakımından işletmeler müşterilerine geniş bir menü sunabilir. Önceden pişirim sağlanması bakımından servis esnasında daha az insan gücüne ve çalışma alanında yerden tasarruf sağlanabilir. Yiyecek ve içecek işletmelerinde müşteri siparişini verdiğinde, ürün kısa bir süre içerisinde servise hazır hale getirilebilir. Vakumlu torbaların içerisine farklı malzemeler katılarak ürünün tat ve aroması güçlendirilebilir (Yıkılmış vd., 2018).

Yukarıda ele alınan bulgular ışığında, sous vide yönteminin başlıca avantajları aşağıda özetlenmiştir:

- Vakumlu ambalaj sayesinde nem ve aroma kaybının önlenmesi
- Kontrollü sıcaklıkla tekrarlanabilir ve tutarlı kalite standartlarının sağlanması
- Geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek vitamin, mineral ve antioksidan retansiyonu
- Daha düşük lipid ve protein oksidasyon değerleri
- Aerobik ve anaerobik patojenlerin inaktivasyonu ile mikrobiyolojik güvenliğin artırılması
- Uzun raf ömrü ve ön pişirim esnekliği ile işletme verimliliğinin artırılması
- Geniş ürün yelpazesine uygulanabilirlik (et, kanatlı, balık, sebze)
- Pişirme kaybının geleneksel yöntemlere kıyasla belirgin biçimde azaltılması

5. SOUS VIDE YÖNTEMİYLE PİŞİRMENİN DEZAVANTAJLARI

Sous vide pişirme yöntemi, pişirme kayıplarını en aza indirerek avantaj sağlıyor olsa da, bu pişirim esnasında özellikle et ürünlerinde Maillard reaksiyonunu engellediğinden dolayı lezzet eksikliğine sebep olur. Şefler bu konudaki çözümü, sous vide ile pişirim sağladıktan sonra ızgara vb. bir teknikle mühürleme işlemini gerçekleştirerek Maillard reaksiyonunun oluşmasını sağlamak ve böylece lezzeti arttırmak şeklinde bulmuşlardır. Sous vide yöntemiyle pişirmede kaslarda oluşan miyogloblin sızıntısıyla ortaya çıkan pembe renk görünümü, tüketiciler tarafından kusur olarak karşılanmaktadır (Kieffer vd., 2000).

Sous vide ile düşük sıcaklıkta bazı ürünlerin ön pişirimleri uzun süreler almaktadır; bu durumda daha fazla enerji tüketilir. Bu yöntemin tükettiği enerji, geleneksel pişirme yöntemlerine kıyasla 5-10 kat daha fazladır. Bu enerji tüketiminin büyük bir bölümü ön ısıtma sürecinde meydana gelmektedir. Sous vide makinesi, vakumlu paketleme ve ambalaj filmleri işletmeye ekstra maliyet oluşturmaktadır (Głuchowski vd., 2020). Bu yöntemde kullanılacak vakumlu ambalaj malzemelerinin hepsi sous vide için uygunluk sağlamayabilir. Sous vide ile pişirim için kullanılan gıda ambalajları ısıya dayanıklı ve su geçirmez olmalıdır. İçeriğine bağlı olarak torbanın kalınlığı da önemlidir; pişirme esnasında oluşabilecek ufak sızıntılar maliyetlerin artmasına sebep olabilir (Thathsarani vd., 2022). Menüdeki fiyatlar belirlenirken ekipmanlara yapılan yatırımların maliyetleri hesaplanmalıdır (Kilibarda vd., 2018). Sous vide ile pişirilen gıdaların kaç dakika ve kaç derecede pişirilmesi gerektiği bilinmelidir; aksi takdirde uzun pişirme süreleri et ve et ürünlerinde daha fazla oksidatif değişikliğe sebep olabilir (Karpińska-Tymoszczyk vd., 2020).

Yukarıda ele alınan bulgular ışığında, sous vide yönteminin başlıca dezavantajları aşağıda özetlenmiştir:

- Maillard reaksiyonunun gerçekleşmemesi nedeniyle lezzet ve renk eksikliği
- Kaslardaki miyogloblin sızıntısından kaynaklanan pembe renk görünümünün tüketici tarafından kusur olarak algılanması
- Geleneksel yöntemlere kıyasla 5-10 kat daha yüksek enerji tüketimi
- Sous vide cihazı, vakum paketleme ünitesi ve özel ambalaj malzemelerinin getirdiği ek maliyet
- Her ambalaj malzemesinin sous vide işlemine uygunluk sağlamaması
- Yanlış sıcaklık-süre kombinasyonlarında artan oksidatif değişiklik riski

- Uzun pişirme sürelerinin gerektirdiği dikkatli planlama ve teknik bilgi gerekliliği

6. SOUS VIDE EKİPMANLARI VE TEKNOLOJİSİ

Sous vide pişirme yönteminin başarılı biçimde uygulanabilmesi, yöntemin temelini oluşturan ekipmanların doğru seçimine ve etkin kullanımına doğrudan bağlıdır. Bu ekipmanların her biri pişirme sürecinin farklı bir aşamasında kritik işlevler üstlenmekte; birbirini tamamlayan bir sistem bütünlüğü içinde çalışmaktadır. Sous vide sisteminin temel bileşenleri; immersion sirkülasyon cihazı (su banyosu), vakum paketleme makinesi ve ısıya dayanıklı vakumlu ambalaj malzemeleri olarak sıralanabilir (Baldwin, 2012; Cui vd., 2021).

7.1. Immersion Sirkülasyon Cihazı (Su Banyosu)

Immersion sirkülasyon cihazı, sous vide yönteminin en temel ekipmanıdır. Bu cihaz, su banyosunun sıcaklığını hassas biçimde kontrol ederek homojen bir ısı dağılımı sağlamaktadır. Günümüzdeki gelişmiş modellerde $\pm 0,1$ °C hassasiyetinde sıcaklık kontrolü mümkün olmakta; bu özellik tutarlı ve tekrarlanabilir pişirme sonuçlarının elde edilmesini güvence altına almaktadır (Keller vd., 2008). Piyasada iki temel su banyosu tipi bulunmaktadır: kapaklı ve sabit hacimli su banyoları ile taşınabilir immersion sirkülasyon cihazları. Sabit hacimli su banyoları genellikle endüstriyel mutfaklarda yüksek hacimli üretim için tercih edilirken; taşınabilir immersion sirkülasyon cihazları, hem profesyonel hem de ev kullanımına uygun tasarımıyla geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmektedir (Thatsarani vd., 2022). Su sirkülasyonunu sağlayan pompa sistemi, su banyosunun tüm yüzeyinde eşit sıcaklık dağılımını garanti ederek ürünün her noktasına aynı ısıl işlemin uygulanmasını sağlamaktadır; bu durum, geleneksel pişirme yöntemlerinde görülen eşitsiz ısı dağılımı sorununu büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır (Silva vd., 2016).

7.2. Vakum Paketleme Makinesi

Vakum paketleme makinesi, sous vide sürecinin ikinci kritik ekipmanıdır. Bu cihaz, gıdanın bulunduğu poşet içindeki havayı tahliye ederek vakumlu bir ortam oluşturmaktadır. Vakumlama işlemi iki temel amaç doğrultusunda gerçekleştirilmektedir: birincisi, gıda ile ısı transfer ortamı (su) arasında doğrudan teması önleyerek ısı iletimini optimize etmek; ikincisi, aerobik mikroorganizmaların gelişimini engelleyerek gıda güvenliğini artırmaktır (Kehlet vd., 2017). Endüstriyel vakum paketleme makineleri, oda içi vakum sistemleri ve dış emişli vakum sistemleri olmak üzere iki ana kategoride incelenmektedir. Oda içi vakum sistemleri, yüksek vakum düzeyi ve tekrarlanabilirlik açısından üstünlük sağladığından profesyonel mutfak uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir. Bu sistemler, sıvı içerikli gıdaları da başarıyla vakumlayabilmekte; bu özellik, et marinasyonu ve çorba gibi sıvı içerikli hazırlıklar için önemli bir avantaj oluşturmaktadır (Yıkış vd.,

2018). Dış emişli vakum sistemleri ise daha kompakt ve ekonomik yapılarıyla küçük ölçekli işletmeler ve ev kullanıcıları için uygun seçenekler sunmaktadır.

7.3. Ambalaj Malzemeleri

Sous vide uygulamalarında kullanılan ambalaj malzemeleri, pişirme sürecinin kalitesi ve gıda güvenliği açısından belirleyici bir rol üstlenmektedir. Bu malzemelerin ısıya dayanıklı, su geçirmez, gıda temasına uygun ve düşük oksijen geçirgenliğine sahip olması gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan poşet malzemeleri arasında polietilen (PE), poliamid (PA) ve polietilen-poliamid kompozit filmler yer almaktadır (Thathsarani vd., 2022). Ambalaj kalınlığı da pişirilecek ürünün niteliğine göre dikkatle seçilmelidir; özellikle kemikli et ürünlerinde keskin yüzeylerin poşeti delme riski göz önünde bulundurularak daha kalın ambalaj malzemeleri tercih edilmelidir. Sous vide ambalaj malzemelerinin Bisfenol A (BPA) içermemesi ve gıda güvenliği standartlarına uygunluğu da tüketici sağlığı açısından önem taşımaktadır. Son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik kaygılarıyla birlikte biyobozunur ve geri dönüştürülebilir sous vide ambalaj malzemeleri üzerine araştırmalar hız kazanmaktadır (Kilibarda vd., 2018).

7.4. Teknolojik Gelişmeler ve Akıllı Sistemler

Sous vide teknolojisi, dijitalleşme ve nesnelerin interneti (IoT) uygulamalarının gıda sektörüne entegrasyonu ile birlikte önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Akıllı telefon uygulamalarıyla uzaktan kontrol edilebilen sous vide cihazları, kullanıcıların pişirme parametrelerini (sıcaklık, süre, alarm sistemleri) mobil cihazlar üzerinden yönetebilmesine imkân tanımaktadır. Bu gelişme, hem ev kullanıcıları için pratiklik sağlamakta hem de endüstriyel ölçekte üretim süreçlerinin uzaktan izlenip yönetilmesine olanak vermektedir (Cui vd., 2021). Endüstri 4.0 uygulamalarının gıda sektörüne yansımaları bağlamında, sous vide ekipmanlarında otomatik kayıt tutma, kritik kontrol noktası (CCP) takibi ve HACCP uyumlu veri yönetimi sistemleri de giderek yaygınlaşmaktadır. Bu gelişmeler, sous vide yönteminin gıda güvenliği yönetimi açısından daha şeffaf, izlenebilir ve güvenilir bir yapıya kavuşmasını sağlamakta; yöntemi endüstriyel ölçekteki gıda üretim tesisleri için de cazip bir seçenek haline getirmektedir (Baldwin, 2012; Thathsarani vd., 2022).

7. SONUÇ VE GENEL DEĞERLENDİRME

Bu derlemede ele alınan çalışmalar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, sous vide pişirme yönteminin et ve sebze ürünlerinde geleneksel pişirme yöntemlerine (haşlama, buharda pişirme, ızgara, fırınlama, mikrodalga) kıyasla genel olarak daha düşük pişirme kaybı, daha yüksek su tutma kapasitesi, daha iyi mineral ve vitamin tutma oranları ve daha güvenilir mikrobiyolojik profil sunduğu görülmektedir. Et ürünlerinde bu durum özellikle tavuk göğsü, ördek göğsü, kaz eti ve dana/kuzu eti örneklerinde tutarlı biçimde gözlemlenmiştir; sebzelerde ise

brokoli, fasulye, pancar ve kereviz gibi ürünlerde toplam fenolik madde ve mineral içeriğinin korunması bakımından benzer eğilimler ortaya çıkmıştır.

Bununla birlikte, derlenen çalışmalar sous vide yönteminin ‘her koşulda üstün’ olduğu yönünde kesin bir genelleme yapılmasına imkân vermemektedir. Örneğin fesleğen infüzyonu örneğinde (Głuchowski vd., 2022), sous vide yönteminin geleneksel demleme yöntemine kıyasla belirgin bir avantaj sağlamadığı görülmüştür; bu durum, sous vide kazanımlarının ürünün yapısına, içerdiği uçucu bileşiklerin ısıya duyarlılığına ve pişirme sıcaklık-süre kombinasyonuna bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, kabak ve yeşil fasulye örneklerinde antioksidan kapasite açısından sous vide yönteminin haşlama veya buharda pişirmeye göre her zaman üstün sonuç vermediği (Yılmaz ve İlyasoğlu, 2023) bulgusu, yöntem seçiminin ürüne özgü olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Sıcaklık ve süre parametreleri, sous vide yönteminin başarısını belirleyen en kritik değişkenler olarak ortaya çıkmaktadır. Et ürünlerinde düşük sıcaklık-uzun süre kombinasyonları mikrobiyolojik güvenliği artırırken (Bıyıklı vd., 2020; Ferigolo vd., 2021; Haghighi vd., 2021), aynı zamanda enerji tüketimini de önemli ölçüde yükseltmektedir (Głuchowski vd., 2020). Bu noktada işletmeler için sous vide yönteminin benimsenmesi, yalnızca ürün kalitesi açısından değil; enerji maliyeti, ekipman yatırımı, ambalaj malzemesi ve iş gücü organizasyonu gibi işletmecilik unsurları açısından da bir maliyet-fayda dengesi gerektirmektedir (Kilibarda vd., 2018; Thatthasrani vd., 2022).

Sonuç olarak, sous vide pişirme yöntemi; besin değerinin korunması, mikrobiyolojik güvenliğin sağlanması, raf ömrünün uzatılması ve duyu kalitenin tutarlı biçimde elde edilmesi açısından gıda endüstrisi ve gastronomi sektörü için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak bu potansiyelin tam olarak değerlendirilebilmesi için, ürün türüne özgü sıcaklık-süre protokollerinin standartlaştırılması, Maillard reaksiyonu kaynaklı lezzet eksikliğinin tamamlayıcı pişirme adımlarıyla (örn. mühürleme) giderilmesi ve işletme ölçeğine uygun maliyet analizlerinin yapılması gerekmektedir. Gelecek çalışmalar için, farklı et ve sebze türlerinde sıcaklık-süre-kalite ilişkisini sistematik biçimde modelleyen, Clostridium botulinum gibi anaerobik patojenler için pastörizasyon eşdeğerliği tablolarını referans alan ve enerji tüketimi ile ürün kalitesi arasındaki dengeyi nicel olarak değerlendiren araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doğrultuda, Türkiye’ye özgü geleneksel et ve sebze ürünleri üzerinde sous vide parametrelerinin optimize edilmesine yönelik çalışmaların yürütülmesi, hem yerli gıda sektörüne katkı sağlayacak hem de yöntemin yerel mutfak kültürüyle bütünleştirilmesine olanak tanıyacaktır.

KAYNAKÇA

- Amoroso, L., Rizzo, V., & Muratore, G. (2019). Nutritional values of potato slices added with rosemary essential oil cooked in sous vide bags. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 15, 1-5.
- Ateş, E., & Unal, K. (2023). The effects of deep-frying, microwave, oven and sous vide cooking on the acrylamide formation of gluten-free chicken nuggets. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100666.
- Ayub, H., & Ahmad, A. (2019). Physiochemical changes in sous-vide and conventionally cooked meat. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 17, 100145.
- Babür, T. E., Tekinşen, K. K., & Gürbüz, Ü. (2019). Some quality qualifications of cooked meat sous vide in the storage process. *Manas Journal of Engineering*, 7(1), 34-41.
- Baldwin, D. E. (2012). Sous vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(1), 15-30.
- Baysal, A. (1993). Beslenme. Hacettepe Üniversitesi Yayınları.
- Bhuyan, A., Hussain, I. A., & Sarma, P. (2022). Sous-vide technique. *Agricultural and Food E-Newsletter*, 4, 5.
- Bıyıklı, M., Akoğlu, A., Kurhan, Ş., & Akoğlu, İ. T. (2020). Effect of different sous vide cooking temperature-time combinations on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of turkey cutlet. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 20, 100204.
- Blumenthal, H. (2008). *The big fat duck cookbook*. Bloomsbury.
- Botinestean, C., Keenan, D. F., Kerry, J. P., & Hamill, R. M. (2016). The effect of thermal treatments including sous-vide, blast freezing and their combinations on beef tenderness of M. semitendinosus steaks targeted at elderly consumers. *LWT*, 74, 154-159.
- Chang, Y. S., Chen, J. W., Wu, Y. H. S., Wang, S. Y., & Chen, Y. C. (2023). A possible systematic culinary approach for spent duck meat: Sous-vide cuisine and its optimal cooking condition. *Poultry Science*, 102(6), 102636.
- Charley, H., & Weaver, C. (1998). *Foods: A scientific approach* (3rd ed.). Prentice-Hall.
- Chiavaro, E., Mazzeo, T., Visconti, A., Manzi, C., Fogliano, V., & Pellegrini, N. (2012). Nutritional quality of sous vide cooked carrots and Brussels sprouts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(23), 6019-6025.
- Creed, P. G. (1995). The sensory and nutritional quality of 'sous vide' foods. *Food Control*, 6(1), 45-52.

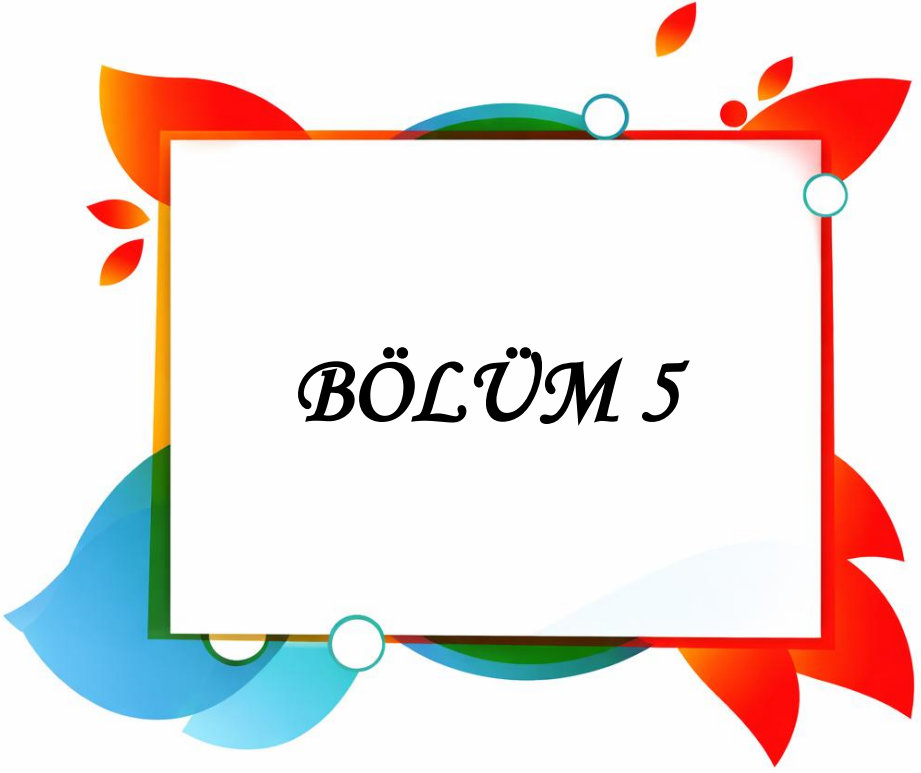
- Cui, Z., Yan, H., Manoli, T., Mo, H., Bi, J., & Zhang, H. (2021). Advantages and challenges of sous vide cooking. *Food Science and Technology Research*, 27(1), 25-34.
- Czarnowska-Kujawska, M., Draszanowska, A., Chróst, M., & Starowicz, M. (2023). The effect of sous-vide processing time on chemical and sensory properties of broccoli, green beans and beetroots. *Applied Sciences*, 13(7), 4086.
- Danesi, F., & Bordoni, A. (2008). Effect of home freezing and Italian style of cooking on antioxidant activity of edible vegetables. *Journal of Food Science*, 73(6), H109-H112.
- Del Pulgar, J. S., Gázquez, A., & Ruiz-Carrascal, J. (2012). Physico-chemical, textural and structural characteristics of sous-vide cooked pork cheeks as affected by vacuum, cooking temperature, and cooking time. *Meat Science*, 90(3), 828-835.
- Dos Reis, L. C. R., De Oliveira, V. R., Hagen, M. E. K., Jablonski, A., Flôres, S. H., & De Oliveira Rios, A. (2015). Carotenoids, flavonoids, chlorophylls, phenolic compounds and antioxidant activity in fresh and cooked broccoli (*Brassica oleracea* var. avenger) and cauliflower (*Brassica oleracea* var. alphina F1). *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), 177-183.
- Ferigolo, L. P., De Oliveira Elias, S., Da Silva, D. C., Lopes, S. M., Geimba, M. P., & Tondo, E. C. (2021). *Escherichia coli* inactivation on tenderloin beef medallions processed by sous vide treatment. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25, 100366.
- Gámbaro, A., Panizzolo, L. A., Hodos, N., Da Rosa, G., Barrios, S., Garmendia, G., ... & Martínez-Monzó, J. (2023). Influence of temperature and time in sous-vide cooking on physicochemical and sensory parameters of beef shank cuts. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, 100701.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A., & Martínez-Monzó, J. (2008). Textural properties of potatoes (*Solanum tuberosum* L., cv. Monalisa) as affected by different cooking processes. *Journal of Food Engineering*, 88(1), 28-35.
- Głuchowski, A., Czarniecka-Skubina, E., & Buła, M. (2020). The use of the sous-vide method in the preparation of poultry at home and in catering—Protection of nutrition value whether high energy consumption. *Sustainability*, 12(18), 7606.
- Głuchowski, A., Czarniecka-Skubina, E., Tambor, K., & Jariénè, E. (2022). Fresh basil infusion: Effect of sous-vide heat treatment on their volatile composition profile, sensory profile, and color. *Molecules*, 27(1), 5.
- Göğüş, A. K. (1986). Et teknolojisi. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No: 991, Ders Kitabı No: 291.

- Hasani, E., Csehi, B., Darnay, L., Ladányi, M., Dalmadi, I., & Kenesei, G. (2022). Effect of combination of time and temperature on quality characteristics of sous vide chicken breast. *Foods*, 11(4), 521.
- Haskaraca, G., & Kolsarıcı, N. (2013). Sous vide pişirme ve et teknolojisinde uygulama olanakları. *Akademik Gıda*, 11(2), 94-101.
- Haghighi, H., Belmonte, A. M., Masino, F., Minelli, G., Lo Fiego, D. P., & Pulvirenti, A. (2021). Effect of time and temperature on physicochemical and microbiological properties of sous vide chicken breast fillets. *Applied Sciences*, 11(7), 3147.
- Hesser, A. (2005, March 13). Under pressure. *The New York Times*, 14.
- Hobani, A. I., Othman, M. B., Fickak, A. A., & Suliman, G. M. (2023). Effects of the sous vide and conventional electric oven cooking methods on the physio-sensory quality attributes of Arabian camel (*Camelus dromedarius*) meat. *Processes*, 11(1), 182.
- Ilic, J., Tomasevic, I., & Djekic, I. (2021). Influence of boiling, steaming, and sous-vide on oral processing parameters of celeriac (*Apium graveolens* var. *rapaceum*). *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 23, 100308.
- Ilic, J., Tomasevic, I., & Djekic, I. (2023). The influence of different cooking treatments on vegetables' bolus properties. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 74(2), 209-218.
- Jeong, K., Hyeonbin, O., Shin, S. Y., & Kim, Y. S. (2018). Effects of sous-vide method at different temperatures, times and vacuum degrees on the quality, structural, and microbiological properties of pork ham. *Meat Science*, 143, 1-7.
- Karpińska-Tymoszczyk, M., Draszanowska, A., Danowska-Oziewicz, M., & Kurp, L. (2020). The effect of low-temperature thermal processing on the quality of chicken breast fillets. *Food Science and Technology International*, 26(7), 563-573.
- Kathuria, D., Dhiman, A. K., & Attri, S. (2022). Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 119, 57-68.
- Kaur, C., & Kapoor, H. C. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables—The millennium's health. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(7), 703-725.
- Kehlet, U., Mitra, B., Ruiz Carrascal, J., Raben, A., & Aaslyng, M. D. (2017). The satiating properties of pork are not affected by cooking methods, sous-vide holding time or mincing in healthy men—A randomized cross-over meal test study. *Nutrients*, 9(9), 941.

- Keller, T., Benno, J., Lee, C., & Rouxel, S. (2008). Under pressure: Cooking sous vide. *Artisan*.
- Kerdpiboon, S., Suraphantapisit, N., Pongpaew, P., & Srikalong, P. (2019). Properties changes of chicken breast during sous-vide cooking and acceptance for elderly. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, 18(2), 156-166.
- Kieffer, K. J., Claus, J. R., & Wang, H. (2000). Inhibition of pink color development in cooked, uncured ground turkey by the addition of citric acid. *Journal of Muscle Foods*, 11(3), 235-243.
- Kilibarda, N., Brdar, I., Baltic, B., Markovic, V., Mahmutovic, H., Karabasil, N., & Stanisic, S. (2018). The safety and quality of sous vide food. *Meat Technology*, 59(1), 38-45.
- Kowalska, J., Miarka, D., Marzec, A., Ciurzyńska, A., Janowicz, M., Galus, S., & Kowalska, H. (2023). Sous-vide as an innovative and alternative method of culinary treatment of chicken breast in terms of product quality and safety. *Applied Sciences*, 13(6), 3906.
- Kozup, J. C., Creyer, E. H., & Burton, S. (2003). Making healthful food choices: The influence of health claims and nutrition information on consumers' evaluations of packaged food products and restaurant menu items. *Journal of Marketing*, 67(2), 19-34.
- Liu, R. H. (2004). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: Mechanism of action. *The Journal of Nutrition*, 134(12), 3479S-3485S.
- Martínez-Hernández, G. B., Artés-Hernández, F., Gómez, P. A., & Artés, F. (2013). Quality changes after vacuum-based and conventional industrial cooking of kailan-hybrid broccoli throughout retail cold storage. *LWT-Food Science and Technology*, 50(2), 707-714.
- Nyam, K. L., Goh, K. M., Chan, S. Q., Tan, C. P., & Cheong, L. Z. (2023). Effect of sous vide cooking parameters on physicochemical properties and free amino acids profile of chicken breast meat. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 105010.
- Nyati, H. (2000). An evaluation of the effect of storage and processing temperatures on the microbiological status of sous vide extended shelf-life products. *Food Control*, 11(6), 471-476.
- Oğuzhan, P., & Yangılar, F. (2014). Su ürünlerinin hazır yemek teknolojisindeki yeri ve önemi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 7(1), 65-76.
- Ortuño, J., Mateo, L., Rodríguez-Estrada, M. T., & Bañón, S. (2021). Effects of sous vide vs grilling methods on lamb meat colour and lipid stability during cooking and heated display. *Meat Science*, 171, 108287.

- Park, C. H., Lee, B., Oh, E., Kim, Y. S., & Choi, Y. M. (2020). Combined effects of sous-vide cooking conditions on meat and sensory quality characteristics of chicken breast meat. *Poultry Science*, 99(6), 3286-3291.
- Podsędek, A. (2007). Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. *LWT-Food Science and Technology*, 40(1), 1-11.
- Rekhy, R., & McConchie, R. (2014). Promoting consumption of fruit and vegetables for better health. Have campaigns delivered on the goals? *Appetite*, 79, 113-123.
- Roldán, M., Antequera, T., Hernández, A., & Ruiz, J. (2015). Physicochemical and microbiological changes during the refrigerated storage of lamb loins sous-vide cooked at different combinations of time and temperature. *Food Science and Technology International*, 21(7), 512-522.
- Schellekens, M. (1996). New research issues in sous-vide cooking. *Trends in Food Science & Technology*, 7(8), 256-262.
- Sila, D. N., Smout, C., Elliot, F., Loey, A. V., & Hendrickx, M. (2006). Non-enzymatic depolymerization of carrot pectin: Toward a better understanding of carrot texture during thermal processing. *Journal of Food Science*, 71(1), E1-E9.
- Silva, F. A., Ferreira, V. C., Madruga, M. S., & Estévez, M. (2016). Effect of the cooking method (grilling, roasting, frying and sous-vide) on the oxidation of thiols, tryptophan, alkaline amino acids and protein cross-linking in jerky chicken. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 3137-3146.
- Da Silva, F. L., De Lima, J. P., Melo, L. S., Da Silva, Y. S., Gouveia, S. T., Lopes, G. S., & Matos, W. O. (2017). Comparison between boiling and vacuum cooking (sous-vide) in the bioaccessibility of minerals in bovine liver samples. *Food Research International*, 100, 566-571.
- Slavin, J. L., & Lloyd, B. (2012). Health benefits of fruits and vegetables. *Advances in Nutrition*, 3(4), 506-516.
- Soletska, A., & Krasota, A. (2017). Prospects of applying vacuum technology in the manufacture of culinary poultry meat products. *Food and Environment Safety Journal*, 15(1).
- Song, Y., Zhang, H., Huang, F., Li, X., Liu, J., Mehmood, W., ... & Zhang, C. (2022). Changes in eating quality and oxidation deterioration of pork steaks cooked by different methods during refrigerated storage. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 29, 100576.
- Stringer, S. C., & Metris, A. (2018). Predicting bacterial behaviour in sous vide food. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 13, 117-128.
- Tanır, F., Sasmaz, T., Bezirci, A., & Senol, V. (2001). Beslenme alışkanlıkları. Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Yayınları.

- Thathsarani, A. P. K., Alahakoon, A. U., & Liyanage, R. (2022). Current status and future trends of sous vide processing in meat industry; A review. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 353-364.
- Ünlüsayın, M. (2008). Hazır yemek (catering) teknolojisinde su ürünlerinin yeri ve önemi. *Gıda Teknolojisi*, 12(10), 56-58.
- Wereńska, M., Haraf, G., Okruszek, A., Marcinkowska, W., & Wołoszyn, J. (2022). The effects of sous vide, microwave cooking, and stewing on some quality criteria of goose meat. *Foods*, 12(1), 129.
- Willett, W. C. (2002). Balancing life-style and genomics research for disease prevention. *Science*, 296(5568), 695-698.
- Yıkımsı, S., Aksu, H., Çöl, B. G., & Demirçakmak, İ. L. (2018). Evaluation of sous-vide technology in gastronomy. *International Journal of Agricultural and Life Sciences*.
- Yılmaz, H., & Bilici, S. (2014). Toplu beslenme hizmetlerinde alternatif pişirme yöntemi: "Sous vide". *Gıda*, 40(3), 163-170.
- Yılmaz, S. N., & İlyasoğlu, H. (2023). Sous vide ve geleneksel pişirme yöntemlerinin kabak ve yeşil fasulyenin renk özellikleri ve antioksidan kapasitesine etkisinin karşılaştırılması. *Food and Health*, 9(1), 37-42.
- Zavadlav, S., Blažić, M., Van De Velde, F., Vignatti, C., Fenoglio, C., Piagentini, A. M., ... & Putnik, P. (2020). Sous-vide as a technique for preparing healthy and high-quality vegetable and seafood products. *Foods*, 9(11), 1537.
- Zemser, R. (2015, March 10). A clean label challenge for product developers. *Food Processing*.
<https://www.foodprocessing.com/product-development/rd/article/11326386/a-clean-label-challenge-for-product-developers>



BÖLÜM 5

Bakliyatların Genel Özellikleri, Anti-Besinsel Faktörleri ve Gıda Olarak Önemi

Serpil Yalım Kaya¹

1. GİRİŞ

Baklagiller, insanlık tarihinin en eski tarımsal ürünleri arasında yer alarak binlerce yıl boyunca uygarlıkların temel protein ve enerji kaynağını oluşturmuştur. "Baklagil" terimi, meyvesi bir kabuk içine alınmış bitkileri ifade etmekte olup Fabaceae familyasına ait yaklaşık 700 cinsten 18.000 kadar tür bulunmaktadır. Bunlar içinde fasulye (*Phaseolus vulgaris*), nohut (*Cicer arietinum*) ve mercimek (*Lens culinaris*), küresel üretim ve tüketimde öne çıkan başlıca türler olarak önem kazanmaktadır (Şahin, 2016, s. 1666). Dünya genelinde insan beslenmesinde bitkisel proteinin %22'sinin ve karbonhidratların %7'sinin baklagillerden sağlandığı bildirilmektedir (Burucu, 2023, s. 1). Bu rakamlar, baklagillerin küresel gıda sistemindeki yapısal rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

Baklagillerin besinsel zenginliğinin yanı sıra, fitik asit-fitatlar, tripsin ve kimotripsin inhibitörleri, lektinler, tanenler, saponinler, oligosakkaritler, vicine ve konvicine gibi anti-besinsel faktörler (ABF) içerdikleri bilinmektedir. Türlerle ve çeşitlere bağlı olarak baklagillerdeki ABF oranı %0,28 ile %2 arasında değişmekte; bu bileşikler besinlerin emilimini, metabolizmasını ve belirli minerallerin biyoyararlılığını olumsuz etkilemektedir (Bora, 2014, s. 287). Ancak son iki on yılın araştırmaları, bu bileşiklerin bir bölümünün kontrollü miktarlarda tüketildiğinde antioksidan, antikarsinojenik ve prebiyotik özellikler sergilediğini de ortaya koymuştur. Bu çift yönlü tablo, ABF yönetiminde "tam eliminasyon" yerine "optimizasyon" yaklaşımını ön plana taşımaktadır (Muzquiz vd., 2012, s. 227).

Geleneksel ıslatma, çimlendirme, kabuk soyma, pişirme ve fermentasyon yöntemleri ABF'leri azaltmada onlarca yıldır uygulanmaktadır. Bununla birlikte ultrasonikasyon, yüksek hidrostatik basınç (YHB), soğuk plazma, darbeli elektrik alanı (PEF), radyo frekans uygulaması ve 3D ekstrüzyon gibi yeni nesil teknolojiler bu alanda çok daha hedeflenmiş ve verimli çözümler sunma potansiyeli taşımaktadır. Ocak 2020-Nisan 2025 döneminde yayımlanan yaklaşık

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Mersin Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, ORCID: 0000-0002-4762-596X

50 çalışmayı kapsayan güncel bir literatür taramasında her iki yöntem grubunun etkinliği ve uygulanabilirliği kapsamlı biçimde değerlendirilmiş; yeni nesil yöntemlerin geleneksel tekniklere kıyasla daha hızlı, daha etkin ve çevre dostu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Sümer, 2022). Bu bölümde, gıda mühendisliği perspektifinden baklagillerin besinsel ve anti-besinsel özellikleri, ABF'leri azaltmaya yönelik geleneksel ve modern yöntemler, gıda güvenliği boyutu ile sağlık etkileri bütüncül ve eleştirel bir yaklaşımla ele alınmaktadır.

2. BAKLAGİL ÜRETİMİ

Küresel baklagil üretimi belirgin bir artış trendi sergilemektedir; 2014 yılında yaklaşık 79 milyon ton olan dünya üretimi 2022'de 426 milyon tona yükselmiştir (Sarioğlu ve Velioğlu, 2018, s. 484). Türkiye'de 2022 yılında kuru baklagiller grubunda nohut 575 bin ton, kuru fasulye 279 bin ton ve kırmızı mercimek 405 bin ton olarak üretilmiştir (TÜİK, 2025). Türkiye, baklagillerin gen merkezi kabul edilen "Verimli Hilal"in coğrafi çekirdeğini oluşturmasıyla birlikte sahip olduğu zengin genetik çeşitlilik, nohut üretiminde dünya üçüncüsü ve kırmızı mercimek üretiminde dünya dördüncüsü konumunu desteklemektedir (FAO, 2024). Bu pozisyon, katma değerli baklagil ürünleri geliştirme ve ihracat kapasitesini güçlendirme açısından stratejik bir fırsat sunmaktadır.

2.1. Nohut, Kuru Fasulye ve Kırmızı Mercimek Üretim Verileri

FAO (2024) verilerine göre 2018-2022 döneminde küresel nohut üretimi 14-18 milyon ton, kuru fasulye üretimi 25-28 milyon ton ve kırmızı mercimek üretimi 5-6 milyon ton bandında seyretmiştir. Nohut üretiminde Hindistan yaklaşık 11 milyon tonla tartışmasız lider konumdadır; Türkiye ise 589 bin tonluk ortalama üretimiyle üçüncü sıradadır. Kırmızı mercimek üretiminde Kanada 2021 itibarıyla 1,6 milyon tonla global arzın yaklaşık %29'unu tek başına karşılamaktadır (Tarımorman.gov.tr, 2025). Kuru fasulye ise üretim miktarı açısından en yüksek hacimli baklagil türü olma özelliğini korumaktadır.

3. BAKLİYATLARIN BESİNSEL ÖZELLİKLERİ

Baklagiller, kuru ağırlık üzerinden %19-30 oranında protein içermekte; bu oran tahılların (ortalama %7-14) ve sebzelerin (%1-5) belirgin biçimde üzerinde yer almaktadır (Hall vd., 2017, s. 11). Protein kalitesi açısından baklagiller, tahıllarda eksik olan lizin amino asidinde zengin; buna karşın metiyonin bakımından sınırlıdır. Bu nedenle tahıl-baklagil kombinasyonu, amino asit tamamlayıcılığı ilkesinin pratik uygulaması olarak dünya mutfaklarında yüzyıllardır benimsenmiş bir beslenme stratejisi oluşturmaktadır (Roy vd., 2010, s. 434). Karbonhidrat içeriği %24-68 arasında değişen baklagillerde dirençli nişasta ve diyet lifi önemli bir yer tutmakta; bu bileşikler düşük glisemik indeks, bağırsak mikrobiyota desteği ve tokluk sinyali açısından gıda mühendisliği formülasyonlarında artan bir ilgi görmektedir (Ashogbon vd., 2021, s. 2940). Mineral içeriği bakımından demir, çinko, magnezyum, kalsiyum ve potasyum

öne çıkan elementlerdir. 100 g pişmiş mercimek, 1-3 yaş çocuklarda demir, çinko ve magnezyumun günlük önerilen alım (RDA) değerlerini karşılayabilecek düzeyde bu mineralleri içermektedir (Benayad ve Aboussaleh, 2021, s. 7). Baklagil kaynaklı biyoaktif peptitler, izoflavonlar, fenolik asitler ve fitosteroller ise gıda bileşeni olarak fonksiyonel ürün geliştirme açısından değerlendirilen bileşikler arasında yer almaktadır.

4. BAKLIYATLARDA ANTİ-BESİNSEL FAKTÖRLER: KİMYASAL YAPI VE MEKANİZMA

Baklagillerdeki anti-besinsel faktörler (ABF), yapısal ve işlevsel açıdan birbirinden farklı bileşik sınıflarını kapsamaktadır. Türlerine ve çeşitlere bağlı olarak bu faktörlerin toplam konsantrasyonu %0,28-2 arasında değişmekte; besinlerin emilimi, metabolizma ve belirli minerallerin biyoyararlılığı üzerinde olumsuz etkiler göstermektedir (Bora, 2014, s. 287). Gıda mühendisliği açısından kritik olan husus, bu bileşiklerin hangi işleme koşullarında ve hangi oranlarda azaltılabileceğini belirlemektir; çünkü etkinlik hem bileşiğin kimyasal yapısına (termolabil/termostabil) hem de uygulanan yöntemin fizikokimyasal parametrelerine bağlıdır.

4.1. Fitik Asit ve Fitatlar

Fitik asit (inositol hekzafosfat, IP6), baklagil tohumlarındaki toplam fosforun %60-90'ını oluşturan ve tohumun çimlenmesi için fosfor depo formu işlevi gören bir bileşiktir. Yapısal olarak altı fosfat grubu taşıyan bu molekül, güçlü şelat yapıcı özelliğiyle kalsiyum (Ca^{2+}), demir (Fe^{2+}/Fe^{3+}), çinko (Zn^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+}) ile çözünmez kompleksler (fitatlar) oluşturmakta; böylece bu minerallerin ince bağırsaktan fizyolojik emilimini kısıtlamaktadır (Bilgiçli, 2002, s. 81). Feizollahi ve arkadaşlarının (2021, s. 4) meta-analizine göre, diyetten fitik asit uzaklaştırıldığında çinko emiliminin %20 ve magnezyum emiliminin %60 oranında arttığı bildirilmektedir. Bunun yanı sıra fitik asit, α -amilaz, pepsin ve tripsin gibi sindirim enzimlerini de inhibe ederek nişasta ve protein sindirimini güçleştirmektedir (Carbas vd., 2021, s. 170). Proteinin kalsiyum veya fitik asitle kompleks oluşturması, protein çözünürlüğünü ve sindirilebilirliğini azaltarak protein kalitesini düşürmektedir (Amat vd., 2022, s. 12037). Öte yandan fitik asidin güçlü antioksidan kapasitesi, Fenton reaksiyonunu engelleyerek serbest radikal üretimini azaltması ve kolon kanseri riskiyle ters yönlü ilişkisi, bu bileşiğin "optimizasyon" çerçevesinde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

4.2. Proteaz Enzim İnhibitörleri (Tripsin, Kimotripsin, Amilaz İnhibitörleri)

Tripsin ve kimotripsin inhibitörleri, serin proteazların aktif bölgesine geri dönüşümlü veya geri dönüşümsüz olarak bağlanarak protein sindirimini kısıtlayan polipeptit yapıları doğal bileşiklerdir (Otlewski vd., 2005, s. 1307). Baklagillerden elde edilen proteaz inhibitörleri iki ana sınıfa ayrılmaktadır: Kunitz tipi (yüksek molekül ağırlıklı, tek zincirli) ve Bowman-Birk tipi (düşük

molekül ağırlıklı, çift başlıklı aktif merkez). Bu iki sınıf hem ısıya duyarlılık hem de hedef enzim özgülüğü bakımından farklılık gösterdiğinden, uygulanacak ısıl işlemin optimizasyonu sınıfa göre farklılaşmak durumundadır. Amilaz inhibitörleri ise bağırsak α -amilaz aktivitesini kısıtlayarak nişasta sindirimini yavaşlatmakta; bu etki postprandiyal kan şekeri yükselmesini sınırlamaktadır (Champ, 2002, s. 311). Proteaz inhibitörleri ısıya duyarlı (termolabil) yapıları nedeniyle standart pişirme koşullarında büyük ölçüde inaktive olmaktadır. Ancak kısmi ısıl işlem veya düşük sıcaklık uygulamalarında (sous vide, ılık fermentasyon) artık aktivite sorun teşkil edebilmektedir.

4.3. Lektinler (Fitohemaglütininler)

Lektinler, karbonhidrat bağlayıcı glikoproteinlerdir; baklagillerde, özellikle fasulye, bezelye ve mercimekte yoğun biçimde bulunmaktadır (Krupa, 2008, s. 151). İnce bağırsak epitel hücrelerinin apikalyüzeyinde bulunan N-asetil-D-galaktozamin veya D-manoz gibi spesifik şeker rezidüleriyle geri dönüşümlü olarak bağlanan lektinler, besin emilimini mekanik olarak engellemekte; yüksek dozlarda bağırsak villuslarını tahrip ederek protein sindirilebilirliğini ciddi ölçüde azaltmaktadır (Roy vd., 2010, s. 433). Ham ya da yetersiz pişirilmiş fasulye tüketiminin neden olduğu gıda zehirlenmesi vakalarının başlıca etkeni faseolus hemaglütinin (PHA) adlı bir lektindir; PHA oral LD50 değeri fare modellerinde yaklaşık 50 mg/kg olup ısıl inaktivasyon için en az 100 °C'de 10 dakika kaynatma gerekmektedir. Lektinlerin ısıya parçalanabilme özelliği, pişirme tabanlı inaktivasyon protokollerini kritik öneme taşımaktadır. Sharon ve Lis'in (2004, s. 56) derlediği veriler ışığında, lektinler biyolojik aktivitelerini 45-60 °C aralığında kısmen korurken 100 °C'de 15 dakika sonra tam inaktivasyona uğramaktadır.

4.4. Tanenler

Tanenler, baklagil tohumlarında özellikle tohum kabuğunda yoğunlaşan yüksek molekül ağırlıklı polifenolik bileşiklerdir. Hidrolize olabilen tanenler (gallotanenler, elagitanenler) ve kondanse tanenler (proantosiyeninler) olmak üzere iki temel grupta incelenmekte; her iki grubun da gıda işleme süreçlerinde gösterdiği davranış birbirinden farklılık göstermektedir (Salem vd., 2005, s. 117). Proteinlerle oluşturdukları tanen-protein kompleksleri çözünmez yapılar oluşturarak protein sindirilebilirliğini %10-40 oranında azaltabilmektedir (Gemede ve Ratta, 2014, s. 287). Tanenler aynı zamanda demir ile çözünmez kompleksler oluşturarak non-hem demirin biyoyararlılığını belirgin biçimde kısıtlamaktadır; bu etki özellikle baklagil ağırlıklı beslenen ve hayvansal gıda tüketimi düşük olan topluluklarda demir eksikliği anemisi riskini artırmaktadır. Kabuk soyma işlemi, tohum kabuğuna lokalize olmuş kondanse tanenlerin büyük bölümünü uzaklaştırmanın en doğrudan yoludur.

4.5. Saponinler

Saponinler, triterpenik ya da steroidal aglikon (sapogenin) çekirdeğine bağlı bir veya birden fazla şeker zinciri taşıyan amphipatik glikozitlerdir. Baklagil bitkilerinin tüm hücrelerinde yaygın olarak dağılan bu bileşikler, hem suda hem de yağda kısmi çözünürlük gösterir; bu özellik onlara yüzey aktif ajan işlevi kazandırmaktadır (Amin vd., 2011, s. 315). Saponinlerin hücre zarıyla etkileşimi, kolesterol ve diğer membran lipitleriyle kompleks oluşturmaya dayanmaktadır. Düşük konsantrasyonlarda serum kolesterol düzeyini azaltma, antifungal ve antiinflamatuvar etkiler gibi biyoaktif özellikler tanımlanmışken; yüksek konsantrasyonlarda hemoliz, bağırsak epitel hasarı ve vitamin emiliminin azalması gibi olumsuz etkiler bildirilmektedir (Huisman vd., 1989, s. 47). Baklagillerdeki saponin düzeyleri türe ve çeşide göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir; soyanın yüksek saponin içeriğiyle (kuru ağırlık üzerinden %0,1-0,5) diğer türlerin belirgin biçimde önüne geçtiği rapor edilmektedir.

4.6. Oligosakkaritler (α -Galaktooligosakkaritler)

Rafinoz ailesi oligosakkaritler (RFO), başta rafinoz, stakiyoz ve verbakoz olmak üzere nohut, börülce, soya ve kuru fasulyede yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır. İnsan ve tek mideli hayvanlar bağırsak mukozasında α -galaktosidaz enzimi bulundurmadığından bu bileşikler ince bağırsakta sindirilememekte; kolona geçerek bağırsak bakterilerinin anaerobik fermentasyonuna maruz kalmaktadır (Krupa, 2008, s. 151). Bu fermentasyon sürecinde açığa çıkan H_2 , CO_2 ve metan gazları; şişkinlik, gaz, kramp ve ishal gibi GI belirtilere yol açmakta, bu durum baklagil tüketimine karşı tüketici direncinin başlıca nedenlerinden birini oluşturmaktadır (Guzmán-Maldonado ve Paredes-Lopez, 1998, s. 297). Öte yandan RFO'ların prebiyotik etkisi giderek daha fazla belgelenmekte; bifidobakteri ve laktobasil gibi faydalı bağırsak bakterilerinin büyümesini seçici olarak uyardığı ve bu yolla bağırsak sağlığına olumlu katkıda bulunduğu bildirilmektedir. Bu prebiyotik potansiyel, RFO'ların da optimizasyon perspektifinden ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.7. Vicine ve Konvicine

Vicine ve konvicine, başta bakla (*Vicia faba*) olmak üzere bazı baklagillerde bulunan pirimidin glikozitlerdir. Bağırsakta hidrolizleriyle oluşan aglikon ürünleri (divicine ve izouramil) güçlü oksidatif stres ajanlarıdır; G6PD (glukoz-6-fosfat dehidrojenaz) enzim eksikliği olan bireylerde favizm adı verilen akut hemolitik anemi tablosunu tetikleyebilmektedir. Bu bileşiklerin termostabil yapısı ve standart pişirme ile yalnızca kısmen uzaklaştırılabilmesi, özellikle G6PD eksikliğinin yaygın olduğu Akdeniz popülasyonlarında bakla tüketimine özel dikkat gerektirmektedir.

5. ANTI-BESİNSEL FAKTÖRLERİ AZALTMA YÖNTEMLERİ

Anti-besinsel faktörlerin azaltılması, baklagillerin besinsel kalitesinin iyileştirilmesinde ve tüketici kabulünün artırılmasında kritik bir teknolojik süreçtir. Bu süreçte uygulanan yöntemlerin etkinliği; hedef ABF'nin kimyasal yapısına (termolabil/termostabil), baklagil çeşidine, işleme parametrelerine (sıcaklık, süre, pH, su aktivitesi) ve yöntem kombinasyonuna göre önemli ölçüde farklılaşmaktadır (Das vd., 2022). Yöntemlerin seçiminde tek bir "evrensel çözüm" bulunmamakta; en rasyonel yaklaşım, azaltılacak ABF türüne ve korunması hedeflenen besin ögesine göre yöntem optimizasyonu ve kombinasyon stratejisi oluşturmaktır. Ocak 2020-Nisan 2025 arasında yayımlanan yaklaşık 50 çalışmanın incelendiği kapsamlı bir literatür taramasında geleneksel yöntemlerin kullanım dağılımı şöyle belirlenmiştir: ıslatma 12 çalışma, fermantasyon 12 çalışma, kaynatma 11 çalışma, çimlendirme 9 çalışma ve kavurma 3 çalışma. Yeni nesil yöntemler arasında ise 3D ekstrüzyon 9 çalışmada, ultrasonikasyon ve yüksek basınç 5'er çalışmada, mikrodalga ve ışınlama 4'er çalışmada ve hidroliz 3 çalışmada yer almıştır (Sümer, 2022).

5.1. Geleneksel Yöntemler

5.1.1. Islatma

Islatma, baklagillerin soğuk (oda sıcaklığı, 8-12 saat) veya sıcak suda (60-100 °C, 30-60 dakika) bekletilmesiyle gerçekleştirilen en temel ön işlem adımıdır. Bu süreçte suda çözünen oligosakkaritler, tanenler, sodyum fitik asit tuzları ve bazı suda çözünür vitaminler difüzyonla ıslatma suyuna geçmektedir; bu nedenle ıslatma suyunun atılması ABF azaltımı açısından zorunludur. Yıldırım ve arkadaşları (2011, s. 137), nohutlarda ıslatmanın pişirme süresini %30-50 oranında kısalttığını bildirmiştir. Prasad ve arkadaşları (2010, s. 485), sıcak su ıslatmanın (60-70 °C) oligosakkarit içeriğini soğuk suya kıyasla %20-35 daha fazla azalttığını göstermiştir; ancak bu koşullarda suda çözünen B vitaminleri ve bazı minerallerde kayıplar da artmaktadır. Kon (1979, s. 1332), artan ıslatma sıcaklığıyla birlikte oligosakkarit, azotlu bileşik ve bazı suda çözünen öğelerin konsantrasyonunun azaldığını saptamıştır. Fitik asidin ıslatma suyuna geçişi sınırlıdır; kalsiyum ve magnezyum tuzları halindeki fitatlar nispeten az çözünür. Bu nedenle ıslatma tek başına fitik asit azaltımında yetersiz kalmakta; çimlendirme, kavurma veya fermantasyon gibi ek süreçlerle kombine edilmesi gerekmektedir.

5.1.2. Kabuk Soyma ve Bölme

Baklagil tohum kabuğu, tanen ve kondanse proantosiyaninlerin, fitik asidin önemli bir bölümünün ve bazı lektinlerin lokalize olduğu anatomik kesimdir. Mekanik kabuk soyma işlemi bu bileşikleri doğrudan uzaklaştırarak protein sindirilebilirliğini artırmakta ve ürünün organoleptik özelliklerini iyileştirmektedir. Dhull ve arkadaşları (2023, s. 5), kabuk soymanın mercimekte fitik asit içeriğini %30-40 oranında azaltabildiğini bildirmiştir. Siva ve Thavarajah (2018, s. 72), kabuk soyma ve bölme işleminin mineral

biyoyararlanımını artırdığını; ancak diyet lifi, fenolik antioksidanlar ve B vitaminleri bakımından kayıplara yol açtığını vurgulamıştır. Bu değiş-tokuş (trade-off), kabuk soyma kararının hedef besin ögesine ve ürün formülasyonuna göre değerlendirilmesini gerektirmektedir.

5.1.3. Isıl İşlem (Kaynatma, Otoklavlama, Mikrodalga, Kavurma)

Isıl işlem, termolabil ABF'lerin (lektinler, tripsin inhibitörleri, kimotripsin inhibitörleri) inaktivasyonunda en güvenilir ve yaygın yöntemdir. Sathe ve arkadaşları (1984, s. 267), standart kaynatma koşullarında (100 °C, 30-60 dakika) baklagillerdeki tripsin inhibitörü ve lektin aktivitesinin %80-100 oranında azaldığını göstermiştir. Wang ve arkadaşları (2009, s. 847), pişirmenin mercimekte tripsin inhibitör aktivitesini, fitik asiti, taneni ve oligosakkaritleri önemli ölçüde azaltırken dirençli nişastayı, toplam diyet lifini ve kalsiyum, bakır, manganez biyoyararlanımını artırdığını ortaya koymuştur.

Otoklavlama (121 °C, 1-2 bar, 15-30 dakika), standart kaynatmaya kıyasla daha yüksek inaktivasyon etkinliği sağlamaktadır; ancak amino asit kayıpları (özellikle lizin ve sistein) ve vitamin (folat, tiamin) degradasyonu riski taşımaktadır. Bai ve arkadaşları (2023), ıslatma, ekstrüzyon, çimlendirme, kavurma, otoklavlama, kaynatma ve mikrodalgada pişirme dahil olmak üzere farklı işleme yöntemlerinin fasulye fitokimyasalları üzerindeki etkilerini karşılaştırmış; mikrodalga işleminin kısa süresi nedeniyle B vitaminlerini daha iyi koruduğunu ancak oligosakkarit azaltımında otoklavlama kadar etkili olmadığını göstermiştir (Li vd., 2024, s. 2041). Kavurma işlemi ise özgün bir tat-aroma profili oluştururken Maillard reaksiyon ürünlerini ve protein çapraz bağlanmasını artırmakta; bu durum sindirilebilirliği olumsuz etkileyebilmektedir. Ozonila ve arkadaşları (2023), kabuk soyma-ıslatma-kavurma kombinasyonunun uygulandığı süreçlerin hem ABF azaltımında hem de duyu kalitede üstün sonuçlar verdiğini bildirmiştir.

5.1.4. Çimlendirme (Filizlendirme)

Çimlendirme, tohumların belirli nem, sıcaklık ve ışık koşullarında kontrollü biçimde germasyona bırakılmasıyla gerçekleştirilen biyokimyasal bir süreçtir. Bu süreçte endojen fitaz enzimi aktive olarak fitik asidi IP5, IP4, IP3 gibi daha düşük inositol fosfat formlarına hidrolize etmekte; proteazlar depo proteinlerini amino asitlere ve biyoaktif peptitlere parçalamakta; amilazlar ise kompleks karbonhidratları basit şekerlere dönüştürmektedir. Avezum ve arkadaşları (2023), çimlenme sırasında meydana gelen fizyolojik ve biyokimyasal değişimleri genotip, çevre koşulları ve hormon kontrolü perspektifinden incelemiş; fitaz aktivasyonunun tür ve çeşide bağlı olarak ilk 24-48 saatte maksimum düzeye ulaştığını göstermiştir. Świeca ve Gawlik-Dziki (2015, s. 104), mercimek filizlerinde çimlenme süresinin fenolik antioksidan içeriği ve antioksidan aktiviteyi artırdığını; bu artışın bileşiklerin in vitro biyoerişilebilirliğini de olumlu yönde etkilediğini bildirmiştir. 96 saatlik çimlendirme sonucunda baklagillerde

protein içeriğinde %2-6, C vitamini içeriğinde ise belirgin bir artış gözlenirken fitik asit içeriğinde %15-40 oranında azalma rapor edilmektedir (Hall vd., 2017, s. 14). Çimlendirmenin sınırlılığı, RFO ve tanenler üzerindeki etkisinin fitik asit kadar güçlü olmaması ve işlem süresinin (48-96 saat) endüstriyel ölçekte lojistik yönetim gerektirmesidir.

5.1.5. Fermantasyon

Fermantasyon, mikrobiyel metabolizma aracılığıyla baklagil matriksinde kapsamlı biyokimyasal dönüşümler gerçekleştiren ve ABF azaltımında en geniş spektrumlu etkiyi sunan geleneksel yöntemlerden biridir. Laktik asit bakterileri (LAB) fermantasyonunda ortam pH'nın düşmesi, fitaz enzimi aktivasyonunu uyarmakta; bu etki fitik asidin hidrolizini doğrudan desteklemektedir. Termostabil ABF'ler üzerinde fermantasyonun üstünlüğü özellikle dikkat çekicidir: Gbedo ve arkadaşları (2024), *Bacillus subtilis* veya *Rhizopus oligosporus*'un hâkim olduğu katı hal fermantasyonunun, pişirme ile yalnızca kısmen giderilen termostabil ANF'leri %40-60 oranında daha fazla azaltabildiğini bildirmiştir. Jarpa-Parra (2018, s. 893), mercimekte 42 °C'de 72 saatlik fermantasyonun lektin aktivitesini tespit edilemez düzeye düşürebildiğini göstermiştir. Fermantasyonun protein sindirilebilirliğine olan katkısı da önemlidir; Khattab ve arkadaşları (2009, s. 1110), ıslatma-mikrodalga-kaynatma-otoklavlama zinciriyle birlikte fermantasyonun baklagillerdeki toplam esansiyel amino asit yarayışlılığını belirgin biçimde artırdığını saptamıştır. Fermantasyon aynı zamanda ürünlere özgün tat-aroma profili kazandırmakta, raf ömrünü uzatmakta ve biyoaktif bileşen içeriğini artırmaktadır (Benayad ve Aboussaleh, 2021, s. 7). Manzoor ve arkadaşları (2021), lakto-fermantasyonun ıslatma, çimlendirme ve ısıl işleme kıyasla oligosakkarit azaltımında daha etkili olduğunu bildirmiştir. Senanayake (2023), fermantasyonun baklagil proteinlerinin su tutma, yağ bağlama, köpürme ve emülsifikasyon gibi tekno-fonksiyonel özellikleri de olumlu yönde dönüştürdüğünü ortaya koymuştur; bu bulgu fermantasyonun yalnızca ABF azaltma değil, bütüncül bir ürün kalitesi iyileştirme aracı olduğunu vurgulamaktadır.

5.2. Yeni Nesil (Modern) Yöntemler

Yeni nesil işleme teknolojileri, geleneksel termal yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda veya besin ögesi kayıplarını en aza indirirken ABF azaltımını maksimize etmek amacıyla geliştirilmekte ve giderek artan ilgi görmektedir. Nasab ve arkadaşları (2024), ısınlama, soğuk plazma, yüksek basınç, ultrason, darbeli ışık ve darbeli elektrik alanı gibi ısıl olmayan yöntemlerin etkinliğinin hem her bir yöntemin fiziksel parametrelerine hem de hedef ABF türüne ve konsantrasyonuna bağlı olarak farklılaştığını bildirmiştir. Buna göre etkili yöntem seçimi, farklı türdeki tohumlar ve tahıllardaki ABF türüne göre tanımlanmak zorundadır. Zambrano ve arkadaşları (2024), ısıl olmayan işlemlerin nohut matrikslerinde organoleptik özellikleri ve biyoaktif bileşikleri

korurken işlem süresini ve enerji-su tüketimini azalttığını; bazı kombinasyon uygulamalarının (ikili tedaviler) tek tedavilerin etkinliğini anlamlı biçimde artırdığını ortaya koymuştur.

5.2.1. Ultrasonikasyon

Akustik kavitasyon ilkesine dayanan ultrason (US) işleme, 20-100 kHz arasında değişen yüksek yoğunluklu, düşük frekanslı ses dalgaları kullanmaktadır. Kavitasyon baloncukların oluşumu, büyümesi ve çökmesiyle ortaya çıkan yoğun mekanik kuvvetler, yüksek kesme gerilmeleri ve lokalize sıcak noktalara (yaklaşık 5000 K) yol açmaktadır; bu mikro-etki fitik asit gibi depo bileşiklerinin hücre matriksinden salınımını hızlandırmaktadır (Kumar vd., 2023). Byanju ve Lamsal (2023), yüksek güçlü sonikasyonun (20 kHz, 50-100 W/cm²) baklagil protein konsantrlerinde tripsin inhibitör aktivitesini %25-35 oranında azaltırken protein çözünürlüğünü ve emülsifikasyon kapasitesini iyileştirdiğini bildirmiştir. Ultrasonun en önemli avantajı, hidrasyon ve ön işlem sürelerini %30-60 oranında kısaltabilmesidir; bu özellik endüstriyel enerji verimliliği açısından değerli bir katkı sunmaktadır.

5.2.2. Yüksek Hidrostatik Basınç (YHB)

YHB işleme (100-1000 MPa), kontrollü sıcaklık koşullarında gıda ürününe tüm yönlerden eşit şekilde basınç uygulayan izostatik bir teknolojidir. YHB'nin temel avantajı, termal olmayan koşullarda mikrobiyal güvenliği sağlarken ısıya duyarlı biyoaktif bileşikleri, vitamin ve lezzet bileşenlerini büyük ölçüde koruyabilmesidir (Molla vd., 2022). Baklagil tohumlarına 400-600 MPa'da uygulanan YHB, protein yapısını kısmen d nature ederek tripsin inhibitörleri ve lektinlerin termal inaktivasyona duyarlılığını artırmakta ve ardından uygulanan ılık pişirme ile sinerjik etki oluşturmaktadır. Rostamabadi ve arkadaşları (2024), YHB'nin baklagil nişasta granüllerine mikroyapısal değişiklikler kazandırarak sindirim enzimi erişimini artırdığını ve biyoyararlanımı iyileştirdiğini göstermiştir. Agrawal ve arkadaşları (2024), fasulyede termal ve termal olmayan işleme stratejilerini kar ıla tırdıkları çalışmalarında YHB'nin fitik asit azaltımında ısıl işlemlle kar ıla tırılabilir sonuçlar verirken amino asit profilini daha iyi koruduğunu ortaya koymuştur.

5.2.3. Darbeli Elektrik Alanı (PEF)

PEF, kısa süreli (1-100  s) yüksek voltajlı (10-80 kV/cm) elektrik darbelerinin uygulanmasıyla gerçekleştirilen bir elektroporasyon tekniğidir. PEF, hücre membranlarında geçici veya kalıcı por oluşturarak hücre içi bileşenlerin salınımını kolaylaştırmakta; bu mekanizma fitik asit, oligosakkarit ve tanen difüzyonunu ıslatma suyuna hızlandırmaktadır. Alasi ve arkadaşları (2024, s. 3), orta yoğunlukta PEF (MIPEF) uygulamasının baklagil proteinlerinde 20.000 darbe sonrasında çözünürlük, köpürme kapasitesi ve su-ya  tutma kapasitesinde önemli gelişmeler sağladığını rapor etmiştir. PEF aynı zamanda enzimatik

inaktivasyon açısından da etkilidir; yeterli alan şiddeti ve darbe sayısında lipoksigenaz ve polifenol oksidaz gibi kalite bozucu enzimleri inhibe ederek renk stabilitesini artırabilmektedir.

5.2.4. Işınlama

Gama ışınları (^{60}Co), X ışınları ve elektron ışınları kullanılan ışınlama teknolojisi, baklagil tohumlarında termostabil ABF'leri doğrudan parçalama potansiyeli taşımaktadır. Nasab ve arkadaşları (2024), düşük doz ışınlamanın (1-5 kGy) baklagillerde serbest radikal oluşumunu tetikleyerek fitik asit ve tanen moleküllerini kısmen parçaladığını ve biyoyararlanımı artırdığını bildirmiştir. Yüksek doz ışınlama (10 kGy ve üzeri) ise protein denatürasyonu ve besi maddesi kayıplarına neden olabilmekte; bu nedenle gıda uygulamalarında doz optimizasyonu kritik öneme sahiptir. Ohanenye ve arkadaşları (2022), ışınlamanın protein sindirilebilirliği üzerindeki etkisini geleneksel ve yeni nesil yöntemlerle karşılaştırmış; orta doz ışınlamanın (2,5-5 kGy) tripsin inhibitörü aktivitesini %20-30 oranında azaltırken amino asit profilini önemli ölçüde koruduğunu göstermiştir.

5.2.5. 3D Ekstrüzyon ve Yapay Zekâ Destekli Süreç Optimizasyonu

3D ekstrüzyon (eklemeli gıda montajı), dijital tasarımlardan yola çıkarak gıda maddelerini katman katman yapılandırarak gelişen bir teknolojidir. Baklagil unu bazlı formülasyonlarda 3D baskı, besin öğeleri ve ABF'lerin mekânsal dağılımını kontrol ederek kişiselleştirilmiş besin profili sunan ürünlerin üretimini olanaklı kılmaktadır. Sucupca ve arkadaşları (2021), bakliyat bazlı ekstrüdatlarda ekstrüzyon değişkenlerinin (sıcaklık, vida hızı, nem içeriği) proteinler, karbonhidratlar, fenolikler ve ABF'ler üzerindeki etkisini belirlemiş; yüksek ekstrüzyon sıcaklığının (150-180 °C) tripsin inhibitörü ve lektin inaktivasyonunda etkili olduğunu, ancak amino asit kayıplarını artırdığını ortaya koymuştur. Aghababaei ve arkadaşları (2024), mercimek proteinlerinin 3D baskı için yenilebilir mürekkep, et analogu ve biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj bileşeni olarak kullanım potansiyelini değerlendirmiş; bu uygulamaların hayata geçirilmesi için protein tekno-fonksiyonel özelliklerin (jelleşme, emülsifikasyon, viskozite) ön işleme optimize edilmesinin zorunlu olduğunu vurgulamıştır. Yapay zekâ (YZ) destekli süreç optimizasyonu ise bu alandaki en yeni yaklaşımı temsil etmektedir; makine öğrenmesi algoritmaları, farklı işleme parametreleri altında ABF azaltma ile besin öğesi korunması arasındaki optimal dengeyi modelleyebilmekte ve büyük ölçekli biyoaktif bileşen keşfine olanak tanımaktadır (Alasi vd., 2024, s. 3).

Tablo 1

Türkiye'de Tüketilen Başlıca Baklagillerde Anti-Besinsel Faktörleri Azaltma Yöntemleri

Baklagil	Geleneksel Yöntemler	Yeni Nesil Yöntemler
Yeşil mercimek	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, mikrodalga, radyo frekans
Kırmızı mercimek	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, mikrodalga, radyo frekans
Kuru fasulye	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, fermentasyon, YHB, radyo frekans
Nohut	Islatma, kaynatma, çimlendirme, kabuk soyma	Otoklavlama, fermentasyon, YHB, radyo frekans
Soya fasulyesi	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Fermentasyon, YHB, radyo frekans
Bakla	Islatma, kaynatma, çimlendirme, kabuk soyma	Otoklavlama, fermentasyon, YHB, radyo frekans
Barbunya	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Fermentasyon, otoklavlama, radyo frekans
Bezelye	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Fermentasyon, radyo frekans
Börülce	Islatma, pişirme, çimlendirme	Fermentasyon, radyo frekans

Not. YHB: Yüksek hidrostatik basınç. Kaynak: Ohanenye vd. (2022); Singh vd. (2025).

Tablo 2

Dünyada Tüketilen Başlıca Baklagillerde Yetiştiriciliğin Yapıldığı Bölgeler ve Azaltma Yöntemleri

Yetiştigi Bölge	Baklagil	Geleneksel Yöntemler	Yeni Nesil Yöntemler
Asya, Amerika, Avustralya	Yeşil mercimek	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, mikrodalga, radyo frekans
Afrika, Amerika, Asya	Kırmızı mercimek	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, mikrodalga, radyo frekans

Afrika, Amerika, Asya	Kuru fasulye	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, fermentasyon, YHB, radyo frekans
Afrika, Asya, Avustralya	Nohut	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, fermentasyon, YHB, radyo frekans
Afrika, Amerika, Asya	Soya fasulyesi	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Fermentasyon, YHB, radyo frekans
Amerika, Asya	Bakla	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Otoklavlama, fermentasyon, YHB, radyo frekans
Amerika, Asya	Barbunya	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Fermentasyon, otoklavlama, radyo frekans
Amerika, Avustralya, Asya	Bezelye	Islatma, kaynatma, çimlendirme	Fermentasyon, radyo frekans
Amerika, Asya	Börülce	Islatma, pişirme, çimlendirme	Fermentasyon, radyo frekans
Amerika, Afrika	Acı bakla	Islatma, kaynatma, kabuk soyma	Fermentasyon, otoklavlama, radyo frekans
Afrika, Amerika, Avustralya	Yonca	Islatma, kontrollü ısı işlem, çimlendirme	Fermentasyon, radyo frekans
Asya	Maş fasulyesi	Islatma, kontrollü ısı işlem, çimlendirme	Fermentasyon, radyo frekans

Not. YHB: Yüksek hidrostatik basınç. Kaynak: Ohanenye vd. (2022); Singh vd. (2025).

Tablo 1 ve Tablo 2 birlikte değerlendirildiğinde, ıslatma ve kaynatmanın hemen tüm baklagil türleri için evrensel bir başlangıç ön işlemi oluşturduğu görülmektedir. Kabuk soyma işlemi yalnızca nohut ve bakla gibi iri tohumlu türlerde uygulanabilirken; yeni nesil yöntemler arasında radyo frekans uygulaması en geniş kapsama sahip teknolojidir. Yüksek hidrostatik basınç ise özellikle sert tohumlu türlerde ve termostabil ABF konsantrasyonunun yüksek olduğu formülasyonlarda tercih edilmektedir. Geleneksel ve yeni nesil yöntemlerin kombinasyonu —örneğin ıslatma + YHB veya çimlendirme + PEF— her iki yaklaşımın üstünlüklerini birleştiren sinerjik etkiler yaratma potansiyeli taşımaktadır (Das vd., 2022).

6. BAKLIYAT GIDALARDA GIDA GÜVENLİĞİ

Gıda güvenliği, baklagillerin hasat öncesinden tüketici sofrasına ulaşana değin geçtiği her aşamayı kapsayan sistematik bir yönetim gerektirmektedir. Güvenli gıda; insanlar tarafından her ne şekilde tüketilirse tüketilsin herhangi bir rahatsızlık vermeyen gıdadır. Bu tanım çerçevesinde baklagil üretim zincirinde üç temel tehlike kategorisi tanımlanmaktadır (Bucak, 2012, s. 15).

6.1. Fiziksel Riskler

Baklagillerde fiziksel riskler; hasat ve işleme süreçlerinde ürünlere karışan taş, çakıl, toprak parçaları, böcek parçaları, bitkisel saplar ve ambalaj materyali kalıntılarından oluşmaktadır. Mercimek ve nohut gibi ürünlerde uygun eleme, boyutlandırma ve optik ayıklama (renkli taş ayırma) sistemlerinin kullanılmaması durumunda bu fiziksel kontaminantların nihai ürüne taşındığı bilinmektedir. Fiziksel kontaminantlar zaman zaman mikrobiyolojik tehlikeleri de beraberinde getirmekte ve gıdanın hijyenik olmayan koşullarda işlendiğine işaret etmektedir (Koçak, 2007, s. 139).

6.2. Kimyasal Riskler

Baklagillerde kimyasal riskler; pestisit kalıntıları, aflatoksin başta olmak üzere mikotoksinler, gübre kalıntıları, veteriner ilaç kalıntıları ve çevresel kontaminantlar (PCB, dioksinler) olarak sınıflandırılmaktadır (Koçak, 2007, s. 138). Aflatoksin B1'in hepatotoksik ve güçlü karsinojenik etkisi nedeniyle IARC Grup 1 karsinojen olarak tanımlanmış olması, depolama hijyeni ve nem kontrolünü baklagil işleme zincirinin kritik kontrol noktaları haline getirmektedir. Avrupa Birliği ve Türk Gıda Kodeksi baklagiller için toplam aflatoksin sınır değerini 4 µg/kg olarak belirlemiştir. Pestisit kalıntıları açısından ise özellikle ihracat pazarlarına yönelik Türk baklagil ürünlerinde AB maksimum kalıntı limit (MRL) uyumu, rekabetçi pazar erişimi için belirleyici bir faktördür.

6.3. Mikrobiyolojik Riskler

Baklagil üretim zincirinde mikrobiyolojik riskler; yetersiz pişirme, kötü hijyen ve hatalı depolama koşullarından kaynaklanmaktadır. Clostridium botulinum, düşük asit ortamında ve anaerobik koşullarda ürettiği botulinum toksiniyle özellikle konserve baklagil ürünlerinde kritik bir risk oluşturmaktadır; yeterli termal işlem ($F_0 \geq 3$ dakika) bu riski kontrol altına alan temel parametredir. Escherichia coli O104:H7'nin 2011 yılında Almanya'da filizlendirilmiş çemen otuna bağlı olarak 53 ölüme yol açtığı salgın, çimlendirme süreçlerinin de sistematik mikrobiyolojik yönetim gerektirdiğini açıkça ortaya koymuştur (Bucak, 2012, s. 37). Salmonella ve Listeria monocytogenes ise düşük nem içerikli baklagil tozları ve unlarında toz partiküllerine bağlı (water activity <0.60) uzun süre canlı kalabilmekte; bu durum fırınlanmamış ürün formülasyonlarında özel bir risk oluşturmaktadır.

6.4. Gıda Güvenliği Yönetim Sistemi

Baklagil işleme tesislerinde HACCP (Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları) ilkelerinin uygulanması, gıda kaynaklı hastalık riskini sistematik biçimde kontrol altına almaktadır. Baklagil işleme hattında tipik kritik kontrol noktaları (CCP) şunlardır: (1) Pişirme/haşlama: termal merkez sıcaklığı (≥ 72 °C, ≥ 15 sn) doğrulaması; (2) Metal dedektörü: fiziksel tehlike tespiti; (3) Nem ölçümü/su aktivitesi kontrolü: depolama öncesi mikotoksin riski yönetimi; (4) Soğuk zincir: pişirilmiş ürünlerde psikrotrofik patojen çoğalmasının önlenmesi. ISO 22000:2018 standardı, HACCP ilkelerini yönetim sistemi altyapısıyla bütünleştirerek tedarikçiden tüketiciye uzanan gıda zincirinin tamamını kapsayan etkin bir iletişim ve dokümantasyon çerçevesi oluşturmaktadır (Bucak, 2011, s. 138). Türkiye'deki baklagil ihracatçısı firmaların bu standartları benimsemesi, özellikle AB pazarına erişim açısından giderek vazgeçilmez bir koşul haline gelmektedir.

7. BAKLIYATLARIN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Baklagil tüketiminin kronik hastalıklar üzerindeki koruyucu etkisi, epidemiyolojik ve klinik araştırmalardan elde edilen tutarlı kanıtlarla desteklenmektedir. Bu alandaki en kapsamlı bulgu, Darmadi-Blackberry ve arkadaşlarının (2004) yedi yıllık çok merkezli çalışmasından gelmektedir: 70 yaş ve üzeri Japon, Yunan, Avustralyalı ve İsveçli bireyler üzerinde yürütülen bu çalışmada baklagil tüketiminde her 20 gram artış için ölüm riskinin %7 oranında azaldığı saptanmış; bu etki büyüklüğü incelenen tüm gıda grupları içinde en güçlü bağımsız öngörücü olarak öne çıkmıştır.

Mekanizma bazında değerlendirildiğinde, baklagillerin düşük glisemik indeksi (GI: 10-40), yüksek diyet lifi ve dirençli nişasta içeriği postprandiyal kan şekeri ve insülin yanıtını sınırlandırmakta; bu özellik tip 2 diyabet yönetiminde terapötik bir değer taşımaktadır (Hall vd., 2017, s. 24). Kardiyovasküler açıdan çözünür diyet lifi, fitosteroller ve globulin sınıfı proteinlerin sinerjik etkisiyle LDL kolesterol düzeylerinde anlamlı düşüşler raporlanmaktadır. Kanser koruması açısından baklagillerden elde edilen izoflavonlar, saponinler, lektinler ve biyoaktif peptitler, in vitro ve hayvan modellerinde tümör hücre proliferasyonunu baskıladıkları gösterilmiştir; günlük %10 pişmiş nohut tüketiminin karsinogenez modellerinde koruyucu etki sergilediği bildirilmektedir (Augustin vd., 2024, s. 2). Baklagillerdeki ABF'lerin çift yönlü biyolojik etkileri bu tabloya ayrı bir boyut katmaktadır: fitik asit ve tanenler, olumsuz mineral emilim etkisinin yanı sıra antioksidan ve antikarsinogenik aktiviteleriyle sağlık koruyucu işlev de üstlenmektedir (Salim vd., 2023). Bu çift yönlü etki, ABF yönetiminde optimizasyon yaklaşımının sağlık perspektifinden de doğru bir strateji olduğunu pekiştirmektedir.

8. BAKLAGİLLERİN DÜNYA VE TÜRK MUTFAĞINDAKİ YERİ

Baklagiller, dünya mutfaklarında tahıllarla birlikte kullanımı yüzyıllardır süregelen evrensel bir gıda grubudur. Pirincin mercimekle, mısırın fasulyeyle ya da bulgurun nohutla kombinasyonu; amino asit tamamlayıcılığı ilkesinin farkında olmaksızın uygulanan en eski beslenme stratejilerinden biri olarak modern gıda biliminin doğrulamasını almış bir gastronomi pratiğidir. Güney Asya'da dosa ve idli (fermente pirinç-mercimek hamuru), Ortadoğu'da mujaddara (mercimek-bulgur), Mısır'da koshari (pirinç-makarna-mercimek-nohut), Kuzey Afrika'da harira (nohut-mercimek çorbası) ve Türk mutfağında ezogelin çorbası, mercimek köftesi, tarhana ve leblebi bu küresel gastronomi çeşitliliğinin temsili örnekleridir. Türk mutfağındaki nohut mayalı ekmek ve tarhana gibi geleneksel fermente ürünler, söz konusu işleme yönteminin hem ABF azaltımında hem de özgün tat-aroma profili kazanımında sağladığı katkının pratik kanıtlarıdır. Türkiye'de coğrafi işaret tescili taşıyan yedi leblebi çeşidi, baklagil eksenli katma değerli gastronomi ekonomisinin somut göstergesidir (Türk Patent, 2024).

9. SONUÇ

Bu bölümde ele alınan bulgular, baklagillerin besinsel zenginliği ile içerdikleri anti-besinsel faktörlerin yönetiminin gıda mühendisliği açısından birbirinden ayrılmaz iki boyutu oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Fitik asit, proteaz inhibitörleri, lektinler, tanenler, saponinler, oligosakkaritler ve vicine-konvicine; yapısal olarak birbirinden farklı, dolayısıyla azaltma stratejileri de farklılaşan bileşikler topluluğudur. Termolabil bileşikler (lektinler, tripsin inhibitörleri) standart pişirme ile büyük ölçüde inaktive olurken; termostabil bileşikler (fitik asit, belirli tanenler, oligosakkaritler) fermentasyon, YHB veya ultrasonikasyon gibi tamamlayıcı işlemleri zorunlu kılmaktadır.

Geleneksel yöntemler içinde ıslatma-fermantasyon kombinasyonu, en geniş spektrumlu ABF azaltımını tek başına herhangi bir yöntemden daha etkin biçimde sağlamaktadır. Yeni nesil teknolojiler ise bu tabloya üç temel katkı sunmaktadır: işlem süresinin kısalması, termolabil besin öğelerinin korunması ve kombinasyon sinerjisi yoluyla azaltım oranının artırılması. Gbedo ve arkadaşlarının (2024) kapsamlı derlemesi, pişirme-fermantasyon sıralamasının termostabil ANF'ler üzerinde seri uygulamanın etkisini yalnızca toplamalı değil, çarpımsal artırabildiğini ortaya koymuştur. Yöntem seçiminde "hedef ABF türü × koruma gerektiren besin öğesi × ürün formu" ekseninde kurgulanan optimizasyon yaklaşımı, hem besinsel kalite hem de gıda güvenliği hedeflerine ulaşmanın en rasyonel yolunu oluşturmaktadır.

Türkiye, sahip olduğu genetik çeşitlilik ve üretim kapasitesiyle baklagil işleme teknolojilerini geliştirme ve endüstriyel ölçeğe taşıma açısından güçlü bir başlangıç noktasına sahiptir. Yerel baklagil çeşitlerinin ABF profillerinin haritalanması ve Türk mutfağına özgü geleneksel ürünlerde yeni nesil işleme teknolojilerinin etkinliğinin test edilmesi, öncelikli araştırma gündemlerini oluşturmaktadır; bu boşlukların giderilmesi hem akademik literatüre hem de endüstriyel uygulamalara doğrudan katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aghababaei, F., McClements, D. J., Pignitter, M., & Hadidi, M. (2024). Comprehensive review of processing, functionality, and potential applications of lentil proteins in the food industry. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103280.
- Agrawal, K., Sharma, V., Joshi, S., & Mangal, M. (2024). Thermal and non-thermal processing methods to reduce antinutritional factors and enhance nutritional functionality of beans. *Applied Food Research*, 4(1), 100375.
- Alasi, S. O., Sanusi, M. S., Sunmonu, M. O., Odewole, M. M., & Adepoju, A. L. (2024). Recent advances in novel technologies for plant-based protein functionality and artificial intelligence integration: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 101036.
- Amat, T., Assifaoui, A., & Schmitt, C. (2022). Phytic acid—A natural compound with promising bioactive properties. *Frontiers in Nutrition*, 9, 935191.
- Amin, I., Norazaidah, Y., & Emmy Hainida, K. I. (2011). Saponin compounds in legumes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(3), 312-317.
- Anderson, J. W., & Major, A. W. (2002). Pulses and lipaemia, short- and long-term effect. *British Journal of Nutrition*, 88(3), 263-271.
- Ashogbon, A. O., Akintayo, C. O., Dauda, A. O., Olubunmi, O. H., & Babatunde, O. A. (2021). Starches from legume crops: Isolation, structure, and physicochemical properties. *Starch/Stärke*, 73(11-12), 2100038.
- Atalay, D., & Gökbulut, İ. (2021). Baklagillerin genel özellikleri ve işleme süreçlerinin besinsel kalitelere etkileri. *Akademik Gıda*, 19(4), 442-451.
- Augustin, L. S. A., Mirrahimi, A., Sievenpiper, J., Kendall, C. W. C., & Jenkins, D. J. A. (2024). Legumes, chickpeas, and cancer. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1-12.
- Avezum, L., Rondet, E., Ustalar, C., Achir, N., Madode, Y., Gibert, O., & Rajjou, L. (2023). Improving the nutritional quality of legumes through germination. *Food Reviews International*, 39(9), 6011-6044.
- Bai, X., Peng, Q., Li, S., & Zheng, L. (2023). Nutritional and phytochemical composition of common beans and effects of processing methods on phytochemicals. *Food Reviews International*, 39(4), 2400-2423.
- Benayad, Z., & Aboussaleh, Y. (2021). Chemical composition, antinutritional factors and mineral bioaccessibility of commonly consumed legumes in Morocco. *Foods*, 10(7), 1498.

- Bilgiçli, N. (2002). Bakliyat ürünlerinde bulunan antibesinsel öğelerin beslenme üzerine etkileri ve bu faktörlerin uzaklaştırılması. Konya Gıda Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 80-87.
- Bodjona, M. B., Douti, D., Gnon, B. N., Tinkaro, Y., Batawila, K., & Akpagana, K. (2023). Technologies to reduce toxin content in faba bean seeds: Advantages, disadvantages and improvement potential. *Food Chemistry*, 402, 134275.
- Bora, P. (2014). Anti-nutritional factors in foods and their effects. *Journal of Academia and Industrial Research*, 3(6), 285-290.
- Bucak, İ. H. (2011). Gıda güvenliği yönetim sistemleri. Doğu Akdeniz Üniversitesi Yayınları.
- Bucak, İ. H. (2012). Gıda güvenliğinin temelleri. Detay Yayıncılık.
- Burucu, Ü. (2023). Türkiye'de kuru baklagil tarımsal yapısı ve üretim istatistiklerinin değerlendirilmesi. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 9(1), 1-14.
- Byanju, B., & Lamsal, B. (2023). Protein-rich pulse ingredients: preparation, modification technologies and impact on important techno-functional and quality characteristics. *Food Reviews International*, 39(6), 3314-3343.
- Carbas, B., Machado, N., Oppolzer, D., Ferreira, L., Brites, C., Rosa, E. A. S., & Barros, A. I. R. N. A. (2021). Minerals, antinutrients and phytochemicals in common bean seeds. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(1), 163-174.
- Champ, M. M. (2002). Non-nutrient bioactive substances of pulses. *British Journal of Nutrition*, 88(3), 307-319.
- Chavan, J. K., Kadam, S. S., & Beuchat, L. R. (1989). Nutritional improvement of cereals by fermentation. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 28(5), 349-400.
- Craig, W. J., & Mangels, A. R. (2009). Position of the American Dietetic Association: Vegetarian diets. *Journal of the American Dietetic Association*, 109(7), 1266-1282.
- Darmadi-Blackberry, I., Wahlqvist, M. L., Kouris-Blazos, A., Steen, B., Lukito, W., Horie, Y., & Horie, K. (2004). Legumes: The most important dietary predictor of survival in older people of different ethnicities. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 13(2), 217-220.
- Das, G., Sharma, A., & Sarkar, P. K. (2022). Conventional and emerging processing techniques for the post-harvest reduction of antinutrients in edible legumes. *Applied Food Research*, 2(1), 100112.
- Dhull, S. B., Kidwai, M. K., Noor, R., Chawla, P., & Rose, P. K. (2023). Functional and biological properties of lentil (*Lens culinaris* Medik.) for its application in food products: A review. *Legume Science*, 5(1), e159.

- Durmaz, Y. (2020). Nohut mayası kullanımının ekmek özelliklerine etkisi. *Gıda Dergisi*, 45(1), 1-10.
- FAO. (2024). FAOSTAT database. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/faostat>
- Feizollahi, E., Mirmahdi, R. S., Zoghi, A., Zijlstra, R. T., Roopesh, M. S., & Vasanthan, T. (2021). Review of the beneficial and detrimental effects of heat treatment on the nutritional and antinutritional compounds of lentil. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(1), 1-16.
- Gbedo, C., Arnaud, E., & Strub, C. (2024). Traditional legume seed fermentation processes: What is the individual impact of the cooking and fermentation stages on the degradation of anti-nutritional factors? *Food Reviews International*, 1-31.
- Gemed, H. F., & Ratta, N. (2014). Antinutritional factors in plant foods. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(4), 284-289.
- Gök, V. (2010). Gıda güvenliği yönetim sistemleri. Nobel Yayın Dağıtım.
- Grdeń, M., & Jakubczyk, A. (2023). Bioactive peptides from legume seeds and their health-promoting properties. *Molecules*, 28(13), 5211-5228.
- Gu, Y., Ma, Z., Li, M., Gao, Y., & Ren, G. (2022). Impact of storage conditions on quality changes and protein digestibility of legumes. *LWT – Food Science and Technology*, 168, 113950.
- Gülümser, A. (2016). Yemeklik tane baklagiller. Hasad Yayıncılık.
- Gurusamy, P., Nagamianammal, B., & Krishnakumar, T. (2022). Legume processing for value-added food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(19), 5265-5280.
- Guzmán-Maldonado, S. H., & Paredes-Lopez, O. (1998). Functional products of plants indigenous to Latin America. In G. Mazza (Ed.), *Functional foods: Biochemical and processing aspects* (pp. 293-328). CRC Press.
- Hall, C., Hillen, C., & Garden Robinson, J. (2017). Composition, nutritional value, and health benefits of pulses. *Cereal Chemistry*, 94(1), 11-31.
- Hou, C., Chen, L., Yang, L., & Ji, X. (2024). An insight into antinutritive factors in plant-based foods: Removal strategies and the effects of processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(8), 2247-2272.
- Huisman, J., van der Poel, A. F. B., & Liener, I. E. (1989). Recent advances of research in antinutritional factors in legume seeds. *Pudoc*.
- Jarpa-Parra, M. (2018). Lentil protein: A review of functional properties and food application. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(4), 892-903.

- Jha, A. B., Tar'an, B., & Warkentin, T. D. (2022). Genetic improvement of antinutrient and micronutrient levels in pulses. *Frontiers in Plant Science*, 13, 874470.
- Kabak, B., & Dobson, A. D. (2011). An introduction to the traditional fermented foods and beverages of Turkey. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(3), 248-260.
- Karaşahin, M. (2015). Topraksız ortamda yetiştirilen bazı tahılların çim suyu verim ve besin değerleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(4), 57-64.
- Khatab, R. Y., Arntfield, S. D., & Nyachoti, C. M. (2009). Nutritional quality of legume seeds as affected by some physical treatments. *LWT – Food Science and Technology*, 42(6), 1107-1112.
- King, E. A., Erdős, B., Picard, M., & Trottier, J. (2024). Food processing and protein digestibility in legumes: A mechanistic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(10), 2913-2929.
- Koçak, C. (2007). Gıda güvenliği ve gıda kaynaklı riskler. *Türkiye Klinikleri Journal of Forensic Medicine*, 4(3), 135-142.
- Kon, S. (1979). Effect of soaking temperature on cooking and nutritional quality of beans. *Journal of Food Science*, 44(5), 1329-1335.
- Krupa, U. (2008). Main nutritional and antinutritional compounds of bean seeds: A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 58(2), 149-155.
- Kumar, G., Le, D. T., Durco, J., Cianciosi, S., Devkota, L., & Dhital, S. (2023). Innovations in legume processing: Ultrasound-based strategies for enhanced legume hydration and processing. *Trends in Food Science & Technology*, 139, 104122.
- Li, Y., Chen, Y., Li, L., Zhao, Y., & Zhang, Z. (2024). Effects of processing methods on the bioactive compounds and antioxidant activity of lentils. *Food Chemistry*, 437, 137428.
- Manzoor, M. T., Haider, M. S., Atif, M., Bashir, U., & Rafaqat, N. (2021). Lactic acid fermentation and its advantages over conventional food processing methods in antinutrient reduction. *Food Science & Nutrition*, 9(4), 1866-1878.
- Minhao, M., Zhihai, L., Mingming, Z., Zengxian, G., Hao, W., & Guojun, W. (2024). Research progress on nutritional composition and processing effects of legumes. *China Plastics/Zhongguo Suliao*, 38(11), 1-18.
- Molla, M. H. R., Dey, B. K., Ahmed, S., & Siddiqui, S. A. (2022). High-pressure processing effects on pulse proteins: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3555-3582.

- Muzquiz, M., Varela, A., Burbano, C., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, M. M. (2012). Bioactive compounds in legumes: Pronutritive and antinutritive actions. *Phytochemistry Reviews*, 11(2-3), 227-244.
- Nasab, S. S., Tahmouzi, S., Feizollahi, E., & Mollakhalili-Meybodi, N. (2024). The effects of novel non-thermal processing (NTP) on anti-nutritional compounds of food grains and seeds. *Food Control*, 110469.
- Ohanenye, I. C., Ekezie, F. G. C., Sarteshnizi, R. A., Boachie, R. T., Emenike, C. U., Sun, X., & Udenigwe, C. C. (2022). Legume seed protein digestibility as influenced by traditional and emerging physical processing technologies. *Foods*, 11(15), 2299.
- Otlewski, J., Jelen, F., Zakrzewska, M., & Oleksy, A. (2005). The many faces of protease-protein inhibitor interaction. *EMBO Journal*, 24(7), 1303-1310.
- Ozonila, A., Ramos, B., & Serrano, L. (2023). Combined processing treatments in legumes: Dehulling, soaking, and roasting for improved quality. *Food Processing and Technology*, 14(2), 45-58.
- Rostamabadi, H., Nowacka, M., Kumar, Y., Xu, S., Colussi, R., Frasson, S. F., & Falsafi, S. R. (2024). Green modification techniques: Sustainable approaches to induce novel physicochemical and techno-functional properties in legume starches. *Trends in Food Science & Technology*, 104389.
- Roy, F., Boye, J. I., & Simpson, B. K. (2010). Bioactive proteins and peptides in pulse crops: Pea, chickpea and lentil. *Food Research International*, 43(2), 432-442.
- Salem, H. B., Saghruni, L., & Nefzaoui, A. (2005). Attempts to deactivate tannins in fodder shrubs with physical and chemical treatments. *Animal Feed Science and Technology*, 122(1-2), 109-121.
- Salim, R., Nehvi, I. B., Mir, R. A., Tyagi, A., Ali, S., & Bhat, O. M. (2023). Anti-nutritional factors: Natural gateways to human health. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1215873.
- Sarioğlu, K., & Velioğlu, H. M. (2018). Baklagillerin beslenmedeki yeri ve önemi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 5(3), 483-490.
- Sathe, S. K., Salunke, D. K., & Cheryan, M. (1984). Technology of removal of unwanted components of dry beans. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 21(3), 263-287.
- Senanayake, D., Torley, P. J., Chandrapala, J., & Terefe, N. S. (2023). Microbial fermentation to improve sensory, nutritional and functional properties of legumes. *Fermentation*, 9(7), 635.
- Sharon, N., & Lis, H. (2004). History of lectins: From hemagglutinins to biological recognition molecules. *Glycobiology*, 14(11), 53-62.

- Singh, R., Chauhan, A., Sharma, V., Anand, A., Bisht, B., & Kiran, M. (2025). Advanced processing techniques for antinutritional factor reduction in legumes. *Food Bioscience*, 63, 105603.
- Siva, N., & Thavarajah, P. (2018). Mineral and antinutrient concentrations in lentil. *Journal of Composition and Analysis*, 72, 74-79.
- Sucapuca, M., Vega, E. N., Maieves, H. A., Berrios, J. D. J., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., & Cámara, M. (2021). Extrusion process as an alternative to improve pulse products consumption: A review. *Foods*, 10(5), 1096.
- Sümer, A. (2022). Baklagillerde anti-besinsel faktörler ve azaltılma yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Świeca, M., & Gawlik-Dziki, U. (2015). Effects of sprouting and postharvest storage on phenolic acids profile and antioxidant capacity of lentil sprouts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(1), 99-107.
- Şahin, A. (2016). Baklagil bitkilerinin biyolojik özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 1665-1670.
- Tamang, J. P., & Kailasapathy, K. (Eds.). (2010). *Fermented foods and beverages of the world*. CRC Press.
- Tarımorman.gov.tr. (2025). Mercimek ve nohut tarım istatistikleri. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://www.tarimorman.gov.tr>
- TÜİK. (2025). Tarımsal üretim istatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://www.tuik.gov.tr>
- Türk Patent ve Marka Kurumu. (2024). Coğrafi işaretli leblebi çeşitleri. <https://www.turkpatent.gov.tr>
- Wang, N., Hatcher, D. W., Tyler, R. T., Toews, R., & Gawalko, E. J. (2009). Effect of cooking on the composition of beans and lentils as well as their starch digestibility. *Food Research International*, 43(2), 884-891.
- Yıldırım, A., Öner, M. D., & Bayram, M. (2011). Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. *Journal of Food Engineering*, 104(1), 134-142.
- Zambrano, N. L., Pérez-Carrillo, E., Serna-Saldívar, S. O., & Tejada-Ortigoza, V. (2024). Effect of thermal, nonthermal, and combined treatments on functional and nutritional properties of chickpeas. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(31), 11356-11374.