



TÜRKİYE VE DÜNYADA GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Doç.Dr. Hatice PEKMEZ

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Gıda Bilimleri ve Mühendisliği

Editör

Doç.Dr. Hatice PEKMEZ

yaz
yayınları

2025

**Türkiye ve Dünyada Gıda Bilimleri ve
Mühendisliği**

Editör: Doç.Dr. Hatice PEKMEZ

© YAZ Yayınları

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

E_ISBN 978-625-8678-42-0

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

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

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Gıda Endüstrisinde 3D Baskı Teknolojisi.....	1
<i>Zeynep Gökem CERİT, Şeyma SÜNBÜL</i>	
Süt ve Süt Ürünlerinden Biyoaktif Peptit Üretimi: Fonksiyonel Gıda Perspektifi	17
<i>Burhan SAYIN, Emel YÜCEL, Tuncay GÜMÜŞ</i>	
Taguchi-Based Recent Applications in Food Processing.....	51
<i>Mehmet GÜLDANE</i>	
Gıda İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği.....	75
<i>Benan DİNÇ GİRGIN</i>	
Dijital İzlenebilirlik Sistemleri ve Akıllı Ambalajlama Teknolojilerinin Gıda Güvenliği Açısından Bütüncül Değerlendirilmesi	96
<i>Zeynep Gökem CERİT</i>	
Mor Patates (Solanum tuberosum L. Var. İlkmor) Ekstraktlarının (su,etanol,metanol) ve Saflaştırılmış Antosiyaninlerinin Gıda Kaynaklı Bakterilere Karşı Antibakteriyel Etkisinin İncelenmesi	113
<i>Zuhal ŞAHİN, Tülay DURAN</i>	
The Effect of Heat Treatment Intensity on Colour Change in Lactose-Free Milk Production: The Contribution of Glucose and Galactose to the Maillard Reaction.....	126
<i>Aslıhan TÜĞEN</i>	

Gıdalarda Mikroplastik Kontaminasyonu: Diyetle Maruziyet ve Sağlık Etkileri150
Hilal ARSLAN BAYRAKCI

Gıdalardan Mikroplastik Alımını Kontrol Etme Yolları.....193
Hilal ARSLAN BAYRAKCI

Gıda Güvenliği: Gıdalarda Toksik Kontaminantlar ve Erken Yaşam Maruziyeti.....209
Cavidan DEMİR GÖKİŞİK

Et Ürünlerinde Nitrit ve Nitrat Kullanımında Alternatif Kürleme Yaklaşımları.....231
Halime ALP

Impact of UHT and Pasteurization Processes on the Stability of Vitamins B2 (Riboflavin) and B12254
Aslıhan TÜĞEN

Evcil Hayvan Maması Güvenliğinde Risk Profili: Rasff Verilerine Dayalı Bir Değerlendirme (2020–2025)279
Senem TÜFEKÇİ

Fonksiyonel Gıdalar: Tüketici Algısı ve Biyoaktif Bileşenlerin Sağlık Üzerine Etkileri.....297
Meryem AKBAŞ

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

GIDA ENDÜSTRİSİNDE 3D BASKI TEKNOLOJİSİ

Zeynep Görkem CERİT¹

Şeyma SÜNBÜL²

1. GİRİŞ

Üç boyutlu (3D) baskı teknolojisi, katmanlı üretim prensibine dayanan ve dijital bir modelden fiziksel bir ürün oluşturulmasını sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. İlk olarak 1980’li yıllarda endüstriyel üretim süreçlerinde kullanılmaya başlanan bu teknoloji, son yıllarda gıda sektöründe de önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Lipton et al., 2015; Sun et al., 2015). Gıda üretiminde 3D baskının temel amacı, bileşenlerin (protein, karbonhidrat ve yağ) kontrollü bir şekilde katmanlar halinde birleştirilmesiyle, özel besin içerikli veya estetik olarak özelleştirilmiş ürünlerin elde edilmesidir (Liu et al., 2018).

Geleneksel gıda işleme yöntemleri, genellikle standartlaştırılmış ürünler elde etmeye odaklanırken, 3D gıda baskısı bireysel beslenme gereksinimlerine göre özelleştirilmiş ürünlerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle teknoloji, özellikle kişiselleştirilmiş beslenme, yaşlı ve disfaji hastalarının beslenmesi, sürdürülebilir gıda kaynaklarının değerlendirilmesi ve gıda tasarımı gibi alanlarda dikkat çekici bir potansiyele sahiptir (Dankar et al., 2018; Godoi et al., 2016). Ayrıca, 3D baskı

¹ Öğr. Gör. Zeynep Görkem CERİT, Ankara Üniversitesi Kalecik Meslek Yüksek Okulu Gıda Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0003- 3955-9584.

² Öğr. Gör. Dr. Şeyma SÜNBÜL, Ankara Üniversitesi Kalecik Meslek Yüksek Okulu Gıda Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0002-3333-7203.

sürecinin dijital kontrol altında yürütülmesi, üretim parametrelerinin (örneğin bileşimi, şekil ve tekstür özellikleri gibi) yüksek hassasiyetle ayarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu da hem ürün kalitesinde tutarlılık hem de malzeme israfının azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Sun et al., 2018).

Gıda endüstrisinde 3D baskı uygulamaları, aynı zamanda Endüstri 4.0 konseptiyle de yakından ilişkilidir. Dijital üretim, sensör teknolojileri ve veri analitiği ile entegre edildiğinde, akıllı ve sürdürülebilir gıda üretim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, bu teknolojinin ticari ölçekte yaygınlaşması hâlen sınırlıdır; özellikle baskı malzemelerinin reolojik özellikleri, üretim hızı, raf ömrü ve yasal düzenlemeler gibi konular, mevcut araştırmaların odak noktası olmaya devam etmektedir (Liu et al., 2018; Pulatsu et al., 2020).

2. 3D BASKI TEKNOLOJİSİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

3D baskı, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımlarıyla oluşturulan dijital modellerin, katman katman fiziksel ürünlere dönüştürülmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu süreçte temel prensip, bir malzemenin (örneğin çikolata, patates püresi, peynir, hamur veya jel formundaki gıda matrisi) belirli bir geometriye göre kontrollü olarak yerleştirilmesi ve katmanların üst üste eklenmesiyle üç boyutlu yapının oluşturulmasıdır (Sun et al., 2015). Gıda endüstrisinde kullanılan 3D yazıcılar, genellikle ekstrüzyon temelli sistemlerdir. Bunun nedeni, bu yöntemin viskoz gıda malzemelerini baskı kafasından homojen biçimde çıkarmaya ve kontrollü bir şekilde şekillendirmeye olanak sağlamasıdır (Arshad et al., 2025; Lille et al., 2018).

3D gıda baskısı süreci temelde üç ana aşamadan oluşur:

- (i) dijital modelin tasarımı
 - (ii) baskı parametrelerinin belirlenmesi
 - (iii) ürünün baskı sonrası işlenmesi.
- Tasarım aşaması, CAD programları veya 3D tarayıcılar aracılığıyla ürün geometrisinin belirlenmesini kapsar.
 - Baskı aşaması, malzemenin yazıcı kafası aracılığıyla tabaka tabaka ekstrüde edilmesini içerir. Bu aşamada malzemenin reolojik özellikleri (özellikle akış davranışı ve viskozite), baskı kalitesini doğrudan etkiler (Dick et al., 2020).
 - Son işlem aşaması ise pişirme, kurutma veya dondurma gibi yöntemlerle ürünün fiziksel ve duyu özelliklerinin stabilize edilmesini sağlar (Guénard-Lampron et al., 2021).

Gıda üretiminde teknolojik özellikler bakımından üç ana 3D baskı tekniği bulunur:

1. Ekstrüzyon temelli sistemler: En yaygın kullanılan yöntemdir. Yarı katı veya macun kıvamındaki malzemelerin sürekli akışla bir nozül aracılığıyla tabaka tabaka yerleştirilmesine dayanır.
2. Mürekkep püskürtmeli (inkjet-based) sistemler: Düşük viskoziteli sıvı malzemelerin mikro damlacıklar hâlinde püskürtülmesiyle çalışır. Genellikle aroma, renk veya besin takviyesi eklemek için tercih edilir (Sun et al., 2018).
3. Selektif lazer sinterleme (SLS): Toz halindeki gıda malzemelerinin lazer enerjisiyle birleştirilmesi prensibine dayanır. Bu yöntemle şeker veya nişasta bazlı ürünlerin üç boyutlu formları elde edilebilir (Hao et al., 2010).

Baskı sürecinin başarısı, kullanılan malzemenin viskoelastik özellikleri, nem içeriği, tanecik boyutu ve ısıya duyarlılığı gibi faktörlere bağlıdır (Pulatsu, et al., 2021). Örneğin çok düşük viskoziteli malzemeler baskı esnasında formunu koruyamazken, aşırı katı malzemeler ise nozülde düzgün çıkamaz. Bu nedenle her gıda matrisi için optimum formülasyonun ve baskı parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, 3D gıda baskısında soğutma sıcaklığı, baskı hızı, nozül çapı ve katman kalınlığı gibi teknik değişkenler de ürünün nihai kalitesini belirleyen kritik faktörlerdir (Yang et al., 2017). Bu parametrelerin doğru optimize edilmesi, hem yapısal stabiliteyi hem de istenen doku ve lezzet özelliklerini sağlamada büyük önem taşır. Sonuç olarak, 3D baskı teknolojisinin gıda endüstrisindeki uygulanabilirliği, yalnızca mekanik tasarım ve donanımın gelişimiyle değil, aynı zamanda gıda bilimi, malzeme mühendisliği ve reoloji gibi disiplinler arası yaklaşımlarla da doğrudan ilişkilidir.

3. GIDA BASKISINDA KULLANILAN MALZEMELER

3D gıda baskısında kullanılan malzemeler, ürünün yapısal stabilitesi, besin değeri, duyu özellikleri ve baskı performansı açısından belirleyici öneme sahiptir. Gıda baskısına uygun materyallerin temel özellikleri; uygun viskoziteye sahip olması, baskı sırasında formunu koruyabilmesi ve katmanlar arasında yeterli yapışma sağlamasıdır (Lille et al., 2018). Bu gereksinimler, materyalin reolojik davranışı ile yakından ilişkilidir. Uygulamada, genellikle protein, karbonhidrat veya yağ bazlı gıda sistemleri, ayrıca hidrokolloidlerle desteklenmiş karışımlar kullanılmaktadır (Sun et al., 2015).

3.1. Protein Bazlı Materyaller

Proteinler, 3D gıda baskısında en çok araştırılan biyopolimer grubunu oluşturur. Bunun temel nedeni, proteinlerin ısıya, pH'ya ve iyonik kuvvet değişimlerine duyarlı olarak jel oluşturma yetenekleridir. Bu özellik, baskı sonrası ürünün şekil stabilitesini, dokusal bütünlüğünü ve duyuşsal özelliklerini iyileştirir (Reuben et al., 2025). Yumurta akı proteini, jelatin, süt proteinleri (özellikle whey ve kazein türevleri) ve bitkisel kaynaklı soya proteini en sık kullanılan protein kaynakları arasında yer alır.

Whey proteini, yüksek biyoyararlanımı ve fonksiyonel özellikleri nedeniyle özel önem taşır. Isıl işlem sonrasında denatürasyon ve protein-protein etkileşimleri sonucu üç boyutlu ağ yapısı oluşturur. Bu sayede baskıdan sonra ürünün dağılmadan katı formda kalması sağlanır (Guo et al., 2022). Ayrıca, proteinlerin emülsifiye edici ve su bağlama kapasitesi sayesinde formülasyonun akışkanlığı kontrol edilebilir, bu da ekstrüzyon tabanlı baskı süreçlerinde düzgün katman oluşumunu kolaylaştırır.

Son yıllarda, alternatif protein kaynakları (örneğin böcek proteinleri, mikrobiyal veya alg bazlı proteinler) sürdürülebilir üretim açısından dikkat çekmektedir. Bu proteinlerin yüksek amino asit içeriği ve çevresel etkilerinin düşük olması, 3D baskı için potansiyel malzeme olmalarını sağlamaktadır (Reuben et al., 2025). Bununla birlikte, bu yeni proteinlerin rheolojik özelliklerinin ve jelasyon davranışlarının optimize edilmesi hâlen araştırma konusudur.

3.2. Karbonhidrat Bazlı Malzemeler

Karbonhidratlar, 3D gıda baskısında yapısal taşıyıcı ve viskozite düzenleyici olarak kullanılır. Nişasta, selüloz türevleri, pektin, agar ve alginat gibi polisakkaritler, akış davranışını ve katman kararlılığını doğrudan etkileyen temel bileşenlerdir.

Özellikle nişasta bazlı sistemler, yüksek su tutma kapasitesi ve jel oluşturma kabiliyeti sayesinde baskı sırasında akışkan hâlde ekstrüde edilip, baskı sonrasında hızlı şekilde katılaşarak ürüne şekil kazandırır (Bugarin-Castillo, 2023). Örneğin, patates püresi veya pirinç unu bazlı karışımların pseudo-plastik akış davranışı, baskı kalitesini artırmakta ve baskı doğruluğunu sağlamaktadır (Liu et al., 2018). Nişasta granüllerinin jelatinizasyon sıcaklığı, karışımın termal stabilitesi ve katman yapışması açısından kritik bir parametredir. Ayrıca, selüloz türevleri (ör. metilselüloz veya karboksimetilselüloz) yapıya esneklik ve form dayanıklılığı kazandırarak, özellikle düşük protein içeren formülasyonlarda yapısal bütünlüğü destekler.

Ek olarak, agar, karagenan ve pektin gibi hidrokolloid polisakkaritlerin jelleşme davranışı iyonik koşullara ve sıcaklığa bağlı olarak değişir; bu sayede baskı sonrası dokusal farklılıklar ve ürün çeşitliliği elde edilir (Mantihal et al., 2017). Bu bileşenler aynı zamanda fonksiyonel gıda sistemlerinde taşıyıcı matris olarak görev yapabilir, örneğin vitamin, probiyotik veya biyoaktif bileşenlerin kapsüllenmesinde kullanılabilir.

3.3. Yağ Bazlı Malzemeler

Yağ fazı, 3D baskı materyalinin duysal ve reolojik özelliklerini belirleyen kritik bir bileşendir. Yağlar, ürünün parlaklık, ağız hissi, kremamsılık ve aromatik taşıma kapasitesi üzerinde önemli rol oynar. Ancak yağların düşük viskoziteye sahip olması, baskı esnasında formun dağılmasına neden olabilir (Dick et al., 2020). Bu nedenle, yağ bazlı sistemlerde genellikle stabil emülsiyonlar veya jel emülsiyonlar (emulgel) kullanılmaktadır.

Protein veya polisakkarit matrisleri, yağ damlacıklarını stabilize ederek baskı formülasyonunun homojenliğini korur. Kakao yağı içeren çikolata sistemleri bu açıdan klasik örneklerdir; kakao yağının erime ve kristalizasyon davranışı,

baskı sürecinde sıcaklık kontrolünü kritik hâle getirir (Hao et al., 2010). Ayrıca bitkisel yağ bazlı sistemlerde, lipid-polimer etkileşimlerinin kontrolü, ürünün nihai dokusu ve raf ömrü açısından önemlidir.

Yeni çalışmalar, yağ bazlı hidrojel sistemleri ve yağ-su çok fazlı yapılarının 3D baskıda kullanılabilirliğini araştırmakta; bu sayede düşük yağlı ancak kremamsı yapıya sahip ürünler elde edilmektedir. Bu gelişmeler, özellikle fonksiyonel ve duyuasal açıdan optimize edilmiş sağlıklı gıdaların geliştirilmesine yöneliktir.

3.4. Hidrokolloidler ve Katkı Maddeleri

Guar gam, ksantan gam, karboksimetilselüloz, agar, pektin gibi hidrokolloidler 3D gıda baskısında viskozite kontrolü, yapı stabilizasyonu ve akış yönetimi açısından kritik katkı maddeleridir. Bu bileşenler, malzemenin akma gerilimi değerini artırarak baskı sırasında formun korunmasını ve katmanların üst üste düzgün yerleşmesini sağlar (Dick et al., 2020).

Hidrokolloidler oranı ve türü, pasta reolojisi ve baskı çözünürlüğü üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin ksantan gam, düşük konsantrasyonlarda dahi yüksek viskozite oluşturur ve ekstrüzyon sürecinde kayma incilmesi (shear thinning) davranışı gösterir; bu da baskı sırasında akışı kolaylaştırırken, baskı sonrasında yapının sabit kalmasını sağlar. Ayrıca, renk, aroma, vitamin, mineral ve fonksiyonel bileşenlerin kontrollü olarak eklenmesi, 3D baskının kişiselleştirilmiş beslenme uygulamaları için kullanılmasını mümkün kılar (Dankar et al., 2018). Mikroenkapsülleme teknolojileriyle birleştirilen baskı sistemleri, bu bileşenlerin hedefe yönelik salınımını sağlayabilir. Böylece hem besinsel hem de fonksiyonel açıdan optimize edilmiş ürünler elde edilir.

Hidrokolloid ve katkı maddeleri, 3D gıda baskısının reolojik, duyuasal ve fonksiyonel başarısında belirleyici rol

oynamaktadır. Bu bileşenlerin kontrollü formülasyonu, gelecekte stabil, estetik ve besleyici baskı ürünlerinin geliştirilmesi için anahtar olacaktır.

4. GIDA ENDÜSTRİSİNDE 3D BASKI UYGULAMALARI

3D gıda baskısı, geleneksel üretim yöntemlerinin ötesine geçerek gıda endüstrisinde kişiselleştirilmiş, estetik ve fonksiyonel ürünlerin tasarlanmasına olanak tanır. Bu teknoloji, hem tüketici taleplerine hem de özel beslenme gereksinimlerine uygun çözümler sunmasıyla öne çıkmaktadır (Arshad et al., 2025; Dankar et al., 2018).

4.1. Kişiselleştirilmiş Beslenme

Kişiselleştirilmiş beslenme, bireylerin yaş, cinsiyet, sağlık durumu veya diyet tercihleri gibi kriterlere göre özel besin profillerinin oluşturulmasını içerir. 3D baskı teknolojisi, makro ve mikro besin bileşenlerinin hassas kontrolü ile bu alanda önemli avantaj sağlar. Örneğin, protein, vitamin veya minerallerin içeriği dijital olarak belirlenebilir ve baskı sırasında malzeme karışımına eklenebilir (Reuben et al., 2025). Bu yaklaşım, özellikle sporcular, veganlar veya besin alerjisi olan bireyler için özel ürünlerin üretilmesinde kullanılmaktadır (Guo et al., 2022).

4.2. Yaşlı ve Hasta Beslenmesi

Yaşlı nüfus ve disfaji gibi yutma güçlüğü yaşayan hastalar için 3D baskı, dokusal olarak optimize edilmiş yiyecekler sunar. Protein veya enerji içeriği artırılmış ve yumuşak, kolay yutulabilir dokuda tasarlanmış ürünler, hem beslenme kalitesini yükseltir hem de güvenli yeme deneyimi sağlar (Yang et al., 2017; Liu et al., 2018). Ayrıca, tat, renk ve şekil açısından çeşitlendirilmiş yiyecekler, yaşlı bireylerin iştahını artırarak besin alımını destekler (Guénard-Lampron et al., 2021).

4.3. Sürdürülebilir Gıda Üretimi

Sürdürülebilirlik, 3D baskının gıda endüstrisindeki en önemli avantajlarından biridir. Alternatif protein kaynakları (böcek proteini, mikrobiyal proteinler, bitkisel bazlı proteinler) 3D baskı ile optimize edilebilir ve geleneksel kaynaklara kıyasla daha düşük çevresel etkiyle ürün haline getirilebilir (Reuben et al., 2025; Guo et al., 2022). Bu yöntem, gıda israfını azaltmak ve kaynakları daha verimli kullanmak açısından da önemlidir. Örneğin, besin değeri yüksek fakat şekil açısından kullanılamayan malzemeler, 3D baskı ile estetik ve fonksiyonel ürünlere dönüştürülebilir (Arshad et al., 2025).

4.4. Estetik ve Tasarım Uygulamaları

3D gıda baskısı, yaratıcı ve estetik tasarım imkânları ile gastronomi dünyasında da ilgi çekmektedir. Karmaşık geometriler, çok renkli baskılar ve dokusal farklılıklar, yalnızca görsel cazibeyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda duyuusal deneyimi de zenginleştirir (Pulatsu et al., 2021). Çikolata, hamur ve sebze bazlı ürünlerde uygulanan bu tasarımlar, restoran ve butik gıda üretiminde yenilikçi sunumlar yaratmak için kullanılmaktadır (Mantihal et al., 2017; Liu et al., 2018).

Sonuç olarak, 3D gıda baskısı, kişiselleştirme, beslenme optimizasyonu, sürdürülebilirlik ve estetik tasarım alanlarında gıda endüstrisine yeni bir boyut kazandırmaktadır. Ancak, geniş çaplı ticarileşme ve günlük kullanım için, malzeme çeşitliliği, baskı hızı, maliyet ve yasal düzenlemeler gibi konularda hâlen araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç vardır (Yang et al., 2017; Arshad et al., 2025).

5. AVANTAJLAR VE SINIRLAMALAR

3D gıda baskı teknolojisi, gıda endüstrisinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Ancak, bu teknolojinin geniş

çapta benimsenmesi için bazı avantajların yanı sıra sınırlamaların da aşılması gerekmektedir.

3D gıda baskı teknolojisinin avantajları; kişiselleştirilmiş beslenme ve fonksiyonel gıdaların üretiminin sağlanması, sürdürülebilir gıda üretimi ve estetik ve yenilikçi tasarımların gerçekleştirilmesidir. 3D baskı, bireylerin beslenme ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş gıda ürünlerinin üretimine olanak tanır. Besin bileşenlerinin hassas kontrolü sayesinde, özel diyet gereksinimlerini karşılayan fonksiyonel gıdaların tasarımı mümkündür. Örneğin, yaşlı bireyler için yumuşak dokulu ve besin değeri yüksek ürünler üretilebilir (Chao et al., 2024). Bu teknoloji, atıkların azaltılması ve gıda israfının önlenmesi açısından önemli avantajlar sunar. Alternatif protein kaynaklarının (örneğin, böcek proteini) kullanımı, çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlar (Feng et al., 2025). Ayrıca, dijital tasarım süreçleri, gıda üretiminde daha verimli ve sürdürülebilir yöntemlerin uygulanmasına olanak tanır (Derossi et al., 2024). 3D baskı, karmaşık geometrik şekillerin ve estetik tasarımların gıda ürünlerine entegre edilmesini mümkün kılar. Bu özellik, gastronomi dünyasında yenilikçi sunumların ve yaratıcı ürünlerin geliştirilmesine olanak tanır (Alghamdy et al., 2024).

3D gıda baskı teknolojisinin teknik ve ekonomik zorluklar, gıda güvenliği ve tüketici kabulü, regülasyon ve standartların eksikliği gibi bazı sınırlandırıcı özellikleri de bulunmaktadır. Yüksek başlangıç maliyetleri, baskı hızının sınırlı olması ve üretim kapasitesinin kısıtlılığı gibi ekonomik engellerle karşı karşıyadır. Ayrıca, baskı sırasında kullanılan malzemelerin reolojik özelliklerinin doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir (Derossi et al., 2024).

Yeni teknolojilerin gıda üretiminde kullanılması, gıda güvenliği ve tüketici kabulü açısından çeşitli endişeleri beraberinde getirmektedir. 3D baskı ile üretilen gıda ürünlerinin

güvenliği, uzun raf ömrü ve besin değerinin korunması gibi konular, daha fazla araştırma ve geliştirme gerektirmektedir (Zhong et al., 2023).

3D gıda baskı ile üretilen ürünlerin yasal düzenlemeleri ve standartları henüz tam olarak belirlenmemiştir. Bu durum, gıda üreticilerinin ve tüketicilerin karşılaştığı belirsizlikleri artırmakta ve teknolojinin ticarileşmesini engellemektedir (Chauhan et al., 2025).

6. SONUÇ

3D gıda baskı teknolojisi, gıda endüstrisinde kişiselleştirme, beslenme optimizasyonu, sürdürülebilir üretim ve estetik tasarım alanlarında devrim niteliğinde fırsatlar sunmaktadır. Bu teknoloji, özellikle bireylerin beslenme ihtiyaçlarına uygun ürünlerin geliştirilmesine olanak tanıyarak kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımını güçlendirmektedir. Yaşlılar, disfaji hastaları ve özel diyet uygulayan bireyler için besin değeri yüksek, dokusal olarak optimize edilmiş ürünlerin üretilmesi, hem beslenme kalitesini artırmakta hem de tüketici deneyimini geliştirmektedir.

Sürdürülebilirlik, 3D gıda baskısının öne çıkan bir diğer avantajıdır. Alternatif protein kaynakları, gıda israfının azaltılması ve kaynakların verimli kullanılması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu yaklaşım, çevresel etkileri minimize ederken, aynı zamanda yenilikçi ve fonksiyonel gıda ürünlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Dijital tasarım süreçleri, malzeme kullanımını optimize ederek üretim verimliliğini artırmakta ve sürdürülebilir gıda sistemlerine katkı sağlamaktadır.

Estetik ve yaratıcı tasarım imkânları, 3D gıda baskısını gastronomi alanında da ön plana çıkarmaktadır. Karmaşık

geometrik şekiller, çok renkli baskılar ve dokusal çeşitlilikler, yalnızca görsel cazibeyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda tüketicilerin duyuusal deneyimini de zenginleştirir. Bu özellik, restoran ve butik gıda üretiminde yenilikçi sunumlar ve müşteri odaklı tasarımlar geliştirilmesine imkân tanır.

Bununla birlikte, teknolojinin yaygın kullanımı hâlen çeşitli sınırlamalara tabidir. Yüksek maliyet, sınırlı baskı hızı, malzeme çeşitliliğinin kısıtlılığı ve gıda güvenliği ile ilgili belirsizlikler, ticarileşmenin önündeki başlıca engellerdir. Ayrıca, 3D baskı ile üretilen gıdaların yasal düzenlemeleri ve standartlarının eksikliği, üreticiler ve tüketiciler açısından önemli bir belirsizlik yaratmaktadır. Bu nedenle, teknolojiye yönelik daha fazla araştırma, geliştirme ve regülasyon çalışması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, 3D gıda baskısı geleceğin gıda üretim teknolojisi olarak yüksek potansiyele sahiptir. Kişiselleştirilmiş beslenme, sürdürülebilirlik ve estetik tasarım gibi alanlarda sağladığı avantajlar, gıda endüstrisinde inovasyonu ve rekabet gücünü artırmaktadır. Ancak, bu potansiyelin tamamen gerçekleştirilebilmesi için teknik, ekonomik ve yasal sınırlamaların aşılması gerekmektedir. Önümüzdeki yıllarda, malzeme bilimi, yazılım geliştirme ve gıda mühendisliği alanlarındaki ilerlemeler, 3D gıda baskısının günlük yaşam ve ticari üretimde daha yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

KAYNAKÇA

- Alghamdy, M., He, I., Satsangee, G. R., Keramati, H., & Ahmad, R. (2024). Enhancing printability through design feature analysis for 3D food printing process optimization. *Applied Sciences*, 14(20), 9587. <https://doi.org/10.3390/app14209587>
- Arshad, R., Saqib, A., Sharif, H. R., Liaqat, A., & Xu, B. (2025). Recent advances in 3D food printing: Therapeutic implications, opportunities, potential applications, and challenges in the food industry. *Food Research International*, 203, 115791. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115791>
- Bugarin-Castillo, Y., Rando, P., Clabaux, M., Moulin, G., & Ramaioli, M. (2023). 3D printing to modulate the texture of starch-based food. *Journal of Food Engineering*, 350, 111499. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111499>
- Chao, C., Nam, H. K., Park, H. J., & Kim, H. W. (2024). Potentials of 3D printing in nutritional and textural customization of personalized food for elderly with dysphagia. *Applied Biological Chemistry*, 67, 25. <https://doi.org/10.1186/s13765-023-00854-7>
- Chauhan, P., Kaushal, M., Vaidya, D., Gupta, A., Kashyap, S., & Suthar, P. (2025). Personalized nutrition to intelligent foods with 3D and 4D printing. *Applied Food Research*, 5(1), 100863. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100863>
- Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E. L., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.018>

- Derossi, A., Spence, C., Corradini, M. G., Le-Bail, A., Zhuang, M., Bhandari, B., & Severini, C. (2024). Personalized, digitally designed 3D printed food towards the reshaping of food manufacturing and consumption. *npj Science of Food*, 8, 54. <https://doi:10.1038/s41538-024-00296-5>
- Dick, A., Bhandari, B., Dong, X., & Prakash, S. (2020). Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food. *Food Hydrocolloids*, 107, Article 105940. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105940>
- Feng, M., Zhang, M., Bhandari, B., Li, C., & Mujumdar, A. S. (2025). Utilizing 3D printing to create sustainable novel food products with innovative ingredients. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 99, 103873. <https://doi:10.1016/j.ifset.2024.103873>
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44–54.
- Guénard-Lampron, V., Masson, M., Leichtnam, O., & Blumenthal, D. (2021). Impact of 3D printing and post-processing parameters on shape, texture and microstructure of carrot appetizer cake. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 72, 102738. <https://doi:10.1016/j.ifset.2021.102738>
- Guo, Z., Arslan, M., Li, Z., Cen, S., Shi, J., Huang, X., Xiao, J., & Zou, X. (2022). Application of protein in extrusion-based 3D food printing: Current status and prospectus. *Foods*, 11(13), 1902. <https://doi:10.3390/foods11131902>
- Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57–64.

- Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 20–27. <https://doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.07.021>
- Lipton, J., Arnold, D., Nigl, F., Lopez, N., Cohen, D. L., & Lipson, H. (2015). Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *Additive Manufacturing*, 1–4, 1–7.
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2018). Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 76–82.
- Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 21–29. <https://doi:10.1016/j.ifset.2017.09.012>
- Pulatsu, E., Su, J.-W., Lin, J., & Lin, M. (2020). Factors affecting 3D printing and post-processing properties of 3D printed foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 61, 102316.
- Pulatsu, E., Su, J.-W., Kenderes, S. M., Lin, J., Vardhanabhuti, B., & Lin, M. (2021). Effects of ingredients and pre-heating on the printing quality and dimensional stability in 3D printing of cookie dough. *Journal of Food Engineering*, 294, 110412. <https://doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.110412>
- Reuben, S. J., Chandra, S., Praveena, B., Santhoshkumar, P., & Moses, J. A. (2025). 3D printing of alternative proteins: Approaches, challenges and advances. *Sustainable*

Materials and Technologies, 43, e01285.
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01285>

- Sun, J., Peng, Z., Yan, L., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015). 3D food printing—An innovative way of mass customization in food fabrication. *Trends in Food Science & Technology*, 43(1), 66–75.
- Sun, J., Zhou, W., Yan, L., Huang, D., & Lin, L. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1–11.
- Yang, F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2017). Recent development in 3D food printing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(14), 3145–3153.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1094732>
- Zhong, L., Lewis, J. R., Sim, M., Bondonno, C. P., Wahlqvist, M. L., Muger, A., Purchase, S., Siddique, K. H. M., Considine, M. J., Johnson, S. K., Devine, A., & Hodgson, J. M. (2023). Three-dimensional food printing: its readiness for a food and nutrition insecure world. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 82(4), 468–477.
<https://doi.org/10.1017/S0029665123003002>

SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİNDEN BİYOAKTİF PEPTİT ÜRETİMİ: FONKSİYONEL GIDA PERSPEKTİFİ

Burhan SAYİN¹

Emel YÜCEL²

Tuncay GÜMÜŞ³

1. GİRİŞ

Biyoaktif peptitler, vücut fonksiyonları üzerinde faydalı etkiler gösteren ve/veya bilinen besin değerlerinin ötesinde insan sağlığını olumlu yönde etkileyen peptit dizileri olarak tanımlanmaktadır. Bu peptitler, gastrointestinal sistemde gerçekleşen sindirim süreçleri, proteolitik enzimler aracılığıyla gerçekleştirilen proteinlerin hidrolizi, kimyasal (asidik veya alkali) hidroliz yada gıda işleme süreçleri (pişirme, olgunlaştırma ve fermentasyon) sonucunda açığa çıkabilmektedir (Abdel-Hamid, Otte, De Gobba, Osman, & Hamad, 2017). Biyoaktif peptitler, proteinlerin geleneksel rollerinin ötesine geçerek, hem beslenme hem de sağlık açısından faydalar sağlayan fonksiyonel bileşenler olarak değerlendirilmektedir (Bhandari et al., 2020). Bu moleküller, uygun amino asit dizilerine sahip protein parçaları olup, insan sağlığını desteklemeye yönelik farklı düzeylerde biyolojik aktivite sergilemektedir. Proteinlerin parçalanma

¹ Gıda Mühendisi, Kaanlar Gıda Sanayi Tic. A.Ş. Tekirdağ-ARGE, ORCID: 0009-0003-1742-0052.

² Dr. Gıda Mühendisi, Kaanlar Gıda Sanayi Tic. A.Ş. Tekirdağ-ARGE, ORCID: 0000-0002-6750-4030.

³ Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, ORCID: 0000-0001-7635-5519.

sonucunda, moleküler yapılarında "şifrelenmiş" halde bulunan bu peptitlerin açığa çıkması sağlanmakta ve böylece biyolojik olarak aktif hale gelmektedir. Elde edilen bu biyoaktivite düzeyi, genellikle yapısal bütünlüğünü koruyan tam proteinlerin sergilediği etkinlik düzeyinden daha yüksek olmaktadır. Bu bağlamda, farklı gıda proteinlerinden biyoaktif peptitlerin elde edilmesi ve bu peptitlerin biyokimyasal ve fonksiyonel karakterizasyonuna yönelik araştırmalar, fonksiyonel gıda bilimi alanında güncel ve hızla gelişen bir araştırma yönelimi olarak öne çıkmakta ve aynı zamanda halk sağlığı açısından da önemli bir itici güç oluşturmaktadır (Kashung & Karuthapandian, 2025).

Gıdalarda bulunan biyoaktif bileşenler, miktar olarak oldukça düşük düzeylerde bulunsalar dahi (Kris-Etherton et al., 2002), diğer gıda bileşenlerine kıyasla daha özgül ve hedefe yönelik fonksiyonlara sahiptir. Bu bileşenler, genellikle besin eksikliğine bağlı hastalıkları önlemekten ziyade, hücresel düzeyde etkiler göstererek çeşitli kronik hastalıkların oluşma riskini azaltmaktadır. Biyoaktif peptitler; sahip oldukları antioksidan özelliklerin yanı sıra, enzim inhibisyonu ve aktivasyonu, reseptör aktivitelerinin düzenlenmesi ve gen ekspresyonunun modülasyonu gibi çok yönlü biyolojik işlevleriyle dikkat çekmektedir. Bu gibi çok boyutlu etkileri nedeniyle, biyoaktif peptitler son yıllarda bilimsel araştırmaların odak noktalarından biri haline gelmiştir. Öte yandan, sentetik gıda katkı maddelerinin artan sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilmesi ve tüketicilerin "doğal," "organik" veya "katkısız" nitelikteki ürünlere yönelik artan eğilimi, araştırmacıların fonksiyonel gıdalarda kullanılabilecek biyoaktif bileşenlerin keşfi ve değerlendirilmesine yönelmesine neden olmuştur.

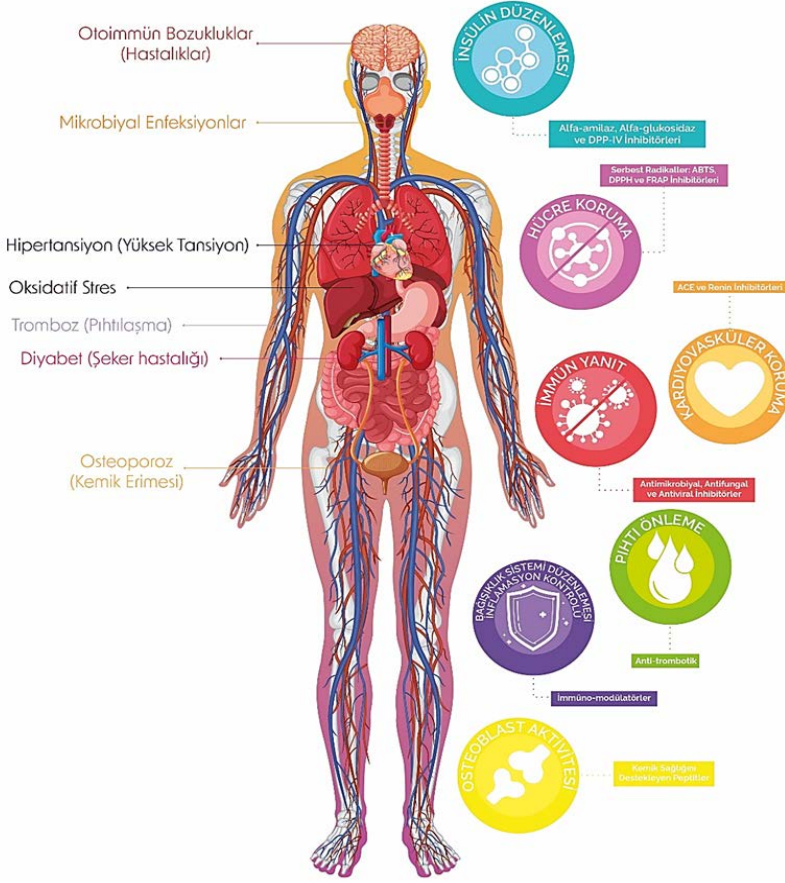
Süt, yalnızca memeli yavrularının büyüme ve gelişimi için gerekli temel besin maddelerini sağlamakla kalmayıp, içerdiği biyoaktif bileşenler sayesinde fonksiyonel gıda araştırmaları

açısından da önemli bir biyolojik kaynak olarak öne çıkmaktadır (Arslaner & Salık, 2019). Bu gibi gıda proteinlerinden elde edilebilen farklı peptitlerin incelenmesi, hem sağlık üzerindeki olumlu etkilerinin belirlenmesi hem de potansiyel besin değerlerinin ortaya konulması açısından büyük bir önem taşımaktadır. Geçmişte, biyoaktif peptitlerin gıda proteinlerinden elde edilmesine yönelik çalışmalar; enzim hidroliz, *in vitro* gastrointestinal sindirim ve mikrobiyal fermentasyon gibi klasik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ulug, Jahandideh, & Wu, 2021). Enzimatik hidroliz sürecinde, proteinler gıda sınıfı proteolitik enzimlerle parçalanarak çok sayıda peptit fraksiyonuna ayrılmakta ve bu sayede biyoaktif bileşenler açığa çıkmaktadır (Mahdavi Yekta et al., 2020). Alternatif bir yöntem olarak, mikrobiyal fermentasyon sırasında mikroorganizmalar tarafından salgılanan proteolitik enzimler aracılığıyla proteinlerin hidrolizi gerçekleşmekte ve peptit hidrolizatlarının oluşumu sağlanmaktadır. Elde edilen bu hidrolizatlar, ikinci aşamada farklı biyolojik aktivitelerinin belirlenmesi amacıyla *in vitro* koşullarda testlere tabi tutulmaktadır (Uraipong & Zhao, 2018). Yüksek düzeyde biyoaktivite gösteren protein hidrolizatları ise *in vivo* çalışmalarla desteklenmekte ve etkinlikleri doğrulanmaktadır (Jiang, Cui, Wang, Xu, & Zhang, 2020).

Bu kitap bölümünde, süt ve süt ürünlerinden elde edilen biyoaktif peptitlerin oluşum mekanizmaları, üretim süreçleri, biyolojik aktiviteleri ve sağlık üzerindeki potansiyel etkileri kapsamlı bir biçimde ele alınacaktır. Ayrıca, bu peptitlerin fonksiyonel gıda formülasyonlarında kullanımı, mevcut araştırma bulguları ışığında değerlendirilecek ve teknolojik uygulamalara yönelik güncel gelişmelere yer verilecektir. Böylece, hem temel bilim hem de uygulamalı gıda bilimi açısından biyoaktif peptitlerin taşıdığı bilimsel ve endüstriyel potansiyelin bütüncül bir çerçevede sunulması amaçlanmaktadır.

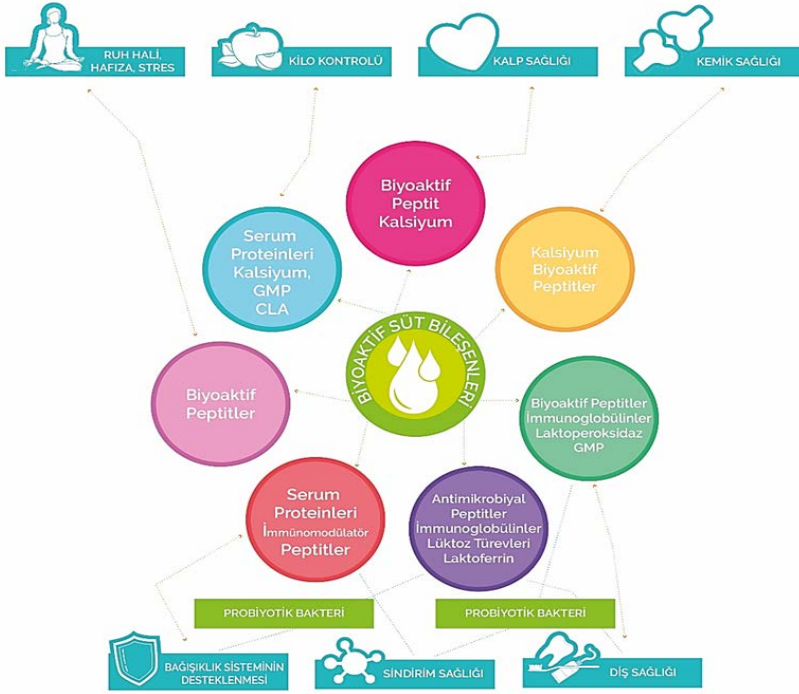
2. BİYOAKTİF PEPTİTLERİN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Proteinler; süt, et ve yumurta gibi hayvansal kaynakların yanı sıra, soya, tahıllar, yağlı tohumlar ve buğday gibi bitkisel kaynaklardan da elde edilebilmektedir. Buna ek olarak, balık, algler ve kabuklular da biyoaktif peptitler açısından oldukça zengin kaynaklar arasında yer almaktadır (Al Khawli et al., 2020). Öte yandan, peptitlerin antimikrobiyal, antioksidan, antihipertansif, immünomodülatör, antidiyabetik ve antiinflamatuvar gibi çok yönlü biyolojik aktiviteleri; moleküler büyüklük, amino asit dizilimi, kimyasal bileşim ve pH değeri gibi çeşitli faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu biyoaktif özellikler **Şekil 1'de** görselleştirilmiştir. Ayrıca, farklı protein kaynaklarından elde edilen çok işlevli peptitlerin varlığı söz konusu bileşiklerin potansiyel farmakolojik etkilerinin yanı sıra, fonksiyonel ve nutrasötik ürünlerin geliştirilmesinde de değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle çeşitli hidrolizatlarda bulunan biyoaktif peptitlerin izole edilmesi ve saflaştırılması, farmakolojik olmayan tedavi yaklaşımlarında kullanılabilecek yenilikçi gıda bileşenlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Elisha, Bhagwat, & Pillai, 2025; R. Wang et al., 2019).



Şekil 1. Peptitlerin sergilediği biyoaktif özellikler

Bu bağlamda, biyoaktif süt bileşenlerinin fraksiyonlanması ve ticarileştirilmesi, süt endüstrisi ile biyoteknoloji alanlarının kesişiminde hızla gelişen ve yüksek ekonomik potansiyele sahip bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu bileşenlerin büyük bir kısmı, süt ürünleri, çeşitli gıda formülasyonları ve farmasötik ürünlerin üretiminde etkin bir şekilde değerlendirilmektedir (Park YoungWoo and Nam MyoungSoo 2015). Biyoaktif süt bileşenlerinin sağlık üzerindeki genel etkileri Şekil 2’de özetlenmiştir(Arslaner & Salık, 2019).



Şekil 2. Biyoaktif Süt Bileşenleri ve Sağlık Üzerine Olan Etkileri

Son yıllarda gerçekleştirilen kapsamlı araştırmalar, sütün hem yeni doğanları hem de yetişkin bireyleri patojen mikroorganizmalara ve çeşitli hastalıklara karşı koruma sağlayan geniş bir yelpazede biyoaktif bileşik içerdiğini ortaya koymaktadır. Bu bileşenler arasında; immünoglobulinler, antibakteriyel peptitler, antimikrobiyal proteinler, oligosakkaritler, lipitler ve düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen önemli biyolojik işlevlere sahip olan "küçük" bileşenler yer almaktadır (Park, 2009b). Bu kapsamda süt, yalnızca temel makro ve mikro temel besin öğeleriyle değil, aynı zamanda içerdiği kazeinler, serum proteinleri ve diğer düşük molekül ağırlıklı biyoaktif bileşenler aracılığıyla da insan sağlığı ve metabolizması üzerinde çok yönlü biyolojik etkiler göstermektedir. Literatürde, söz konusu bileşenlerin çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerde aktif rol oynayarak sağlık

üzerinde belirgin yararlar sağladığı bildirilmektedir (Gobbetti, Minervini, & Rizzello, 2007; Hannu Korhonen & Pihlanto-Leppälä, 2004; Park, 2009a). Süt kaynaklı biyoaktif bileşenlerin işlevsel özellikleri genel olarak dört ana başlık altında sınıflandırılmaktadır: (i) gastrointestinal sistemin gelişimi, aktivitesi ve fonksiyonlarının düzenlenmesi; (ii) bağışıklık sisteminin gelişimi ve immün yanıtın desteklenmesi; (iii) neonatal büyüme ve gelişimin desteklenmesi ve (iv) antibiyotik ve probiyotik etkiyi içeren mikrobiyal aktivitenin modülasyonu. Bu yönleriyle süt, yalnızca besleyici bir gıda maddesi değil, aynı zamanda biyoaktif bileşenleri aracılığıyla terapötik ve fonksiyonel potansiyele sahip bir biyolojik sistem olarak değerlendirilmektedir. (Gobbetti et al., 2007; Park YoungWoo & Nam MyoungSoo, 2015).

Süt ve süt ürünlerinde yer alan biyoaktif bileşenler arasında, biyoaktif peptitler, hem bilimsel açıdan en yoğun şekilde araştırılan hem de fonksiyonel özellikleri bakımından en fazla ilgi gören bileşen gruplarından birini oluşturmaktadır. Bu peptitler, vücudun fizyolojik ve metabolik işlevleri üzerinde olumlu etkiler gösteren ve dolayısıyla insan sağlığına çeşitli düzeylerde faydalar sağlayabilen spesifik protein parçacıkları olarak tanımlanmaktadır (Kitts & Weiler, 2003)., ve tüketicilere yalnızca süt ürünleri aracılığıyla değil, besin takviyeleri veya tıbbi amaçlı gıdalar biçiminde de ulaştırılabilmektedir.

Süt proteinlerinden türetilen bu peptitler, ana protein zinciri içerisinde genellikle inaktif formda bulunurlar. Ancak, belirli koşullar altında serbest hale gelerek biyolojik aktivitelerini gösterebilirler. Bu aktivasyon süreci temelde üç temel mekanizma aracılığıyla gerçekleşmektedir: (i) gastrointestinal sistemdeki sindirim enzimlerinin etkisiyle meydana gelen proteolitik hidroliz, (ii) proteolitik mikroorganizmaların süt proteinlerini parçalaması(iii) mikroorganizmalar ya da bitkilerden elde edilen proteolitik enzimlerin dışsal uygulaması

yoluyla gerçekleştirilen hidroliz işlemleri (Park YoungWoo & Nam MyoungSoo, 2015). Bu mekanizmalar sonucunda ortaya çıkan biyoaktif peptitler, antihipertansif, antimikrobiyal, antioksidan, immünomodülatör ve opioid benzeri etkiler gibi geniş bir biyolojik aktivite yelpazesi sergileyerek, süt ve süt ürünlerinin fonksiyonel değerine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Biyoaktif peptitler, genellikle 2 ila 20 amino asitten oluşan ve ortalama moleküler ağırlığı 1-10 kDa'nın arasında değişen küçük, diyet kaynaklı protein fraksiyonlarıdır (Chalamaiah, Ulug, Hong, & Wu, 2019; Sarmadi & Ismail, 2010). Çeşitli biyolojik aktiviteleri nedeniyle, diyet proteinlerinden türetilen bu peptitler son yıllarda gıda bilimi ve biyoteknoloji alanlarında yoğun şekilde araştırılan önemli bileşikler arasında yer almaktadır. Biyoaktif peptitlerin üretiminde enzimatik hidroliz, mikrobiyal fermentasyon ve gastrointestinal sindirim, biyoaktif peptitlerin üretiminde en yaygın kullanılan süreçler arasında yer almaktadır. Söz konusu biyoaktif peptitler; antihipertansif (Sutopo, Sutrisno, Wang, & Hsu, 2020), antioksidan (Cotabarren et al., 2019), antimikrobiyal (Chandrashekar, Vijayakumar, Chelliah, & Oh, 2020), antidiyabetik (Castañeda-Pérez, Jiménez-Morales, Castellanos-Ruelas, Chel-Guerrero, & Betancur-Ancona, 2021) ve immünomodülatör (Yang, Cai, Huang, & Wang, 2020) gibi farklı biyolojik aktiviteler sergilemektedir. Bu biyolojik işlevler; peptitlerin kaynaklandığı protein türüne, üretim ve işleme koşullarına, amino asit dizilimine ve bileşimine, moleküler ağırlığına, yük dağılımına, pH değerine ve uygulanan kimyasal işlemlere önemli ölçüde bağlıdır (de Castro & Sato, 2015). Bununla birlikte, biyoaktif peptitlerin diyabet ve hipertansiyon gibi kronik hastalıkların tedavisine yönelik farmasötik formülasyonlarında potansiyel kullanım alanlarının bulunduğu bildirilmektedir (Xu, Hong, Wu, & Yan, 2019).

Endüstriyel gıda üretimi süreçlerinde gıda matrisleri, yüksek sıcaklık, basınç ve diğer işleme koşullarından kaynaklanan stres faktörlerine maruz kalmaktadır. Bu durum, gıda bileşenleri içerisinde taşınan biyoaktif peptitlerin işleme veya depolama aşamalarında kararsız hale gelmesine ve dolayısıyla biyoaktif özelliklerinde değişimlerin meydana gelmesine neden olabilmektedir (Udenigwe & Fogliano, 2017). Örneğin, farklı süt işleme teknikleri bazı durumlarda yeni alerjenik peptitlerin oluşumunu tetikleyebilirken, bazı durumlarda protein kaynaklı alerjenitenin azalmasına da neden olabilmektedir. Benzer biçimde, sindirim süreçleri de gıdalardaki peptit profili üzerinde önemli değişikliklere neden olabilmektedir. Yapısal bütünlüğü korunmuş peptitlerin (intakt peptit), bağımsız şekilde veya protein hidrolizatının bir bileşeni olarak emilimi, bu biyoaktif bileşiklerin oral yolla etkin şekilde biyoyararlanım potansiyelini artıran önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Chakrabarti, Guha, & Majumder, 2018).

Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar, gıda kaynaklı çeşitli biyoaktif peptitlerin ve protein hidrolizatlarının, yalnızca besinsel rollerinin ötesinde antioksidan, Anjiyotensin Dönüştürücü Enzim (ACE) inhibitörü ve antidiyabetik etkiler gibi ek sağlık faydaları sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Antioksidan özellikteki peptitler; reaktif oksijen türlerini nötralize ederek, serbest radikalleri uzaklaştırarak, pro-oksidatif metal iyonlarını şelatlayarak veya hücre içi antioksidan enzim aktivitelerini artırarak etki göstermektedir. Hipertansiyon; koroner kalp hastalığı, inme ve kalp ya da böbrek yetmezliği gibi ciddi sağlık sorunlarının gelişiminde önemli bir risk faktörü olup, küresel ölçekte en yüksek ölüm oranlarına neden olan başlıca etmenlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, doğal kaynaklardan elde edilen ACE inhibitörü peptitlerin, hipertansiyonun önlenmesi ve yönetimi açısından potansiyel bir farmasötik alternatif oluşturduğu bildirilmektedir. Öte yandan,

antidiyabetik peptitler genellikle Dipeptidil Peptidaz-IV (DPP-IV) enziminin aktivitesini inhibe ederek etki göstermektedir (Wang, Chen, Zhang, Piao, & Shi, 2019). Ayrıca, gıdalardan elde edilen bazı biyoaktif peptitlerin; karbonhidrat sindiriminde görev alan alfa-amilaz ve alfa-glukozidaz enzimlerini baskılaması, pankreatik insülin salımını artırması, tokluk hissini düzenlemesi ve mide kaynaklı glikoz emilimini azaltması yoluyla antidiyabetik etki gösterebildiği rapor edilmiştir (Göksu, Çakır, & Gülseren, 2022; Yan, Zhao, Yang, & Zhao, 2019).

İnsan organizmasında doğal fizyolojik süreçler, çevresel etkenler ile etkileşim ve dengesiz beslenme sonucunda büyük miktarlarda reaktif oksijen türleri (ROS) ve serbest radikalleri oluşabilmektedir. Bu radikaller sadece dışsal kaynaklar değil, aynı zamanda içsel metabolik süreçler sonucunda ortaya çıkan türevleri de önemli ölçüde oksidatif yük oluşturur. Organizmanın bu serbest radikalleri nötralize etme veya azaltma gereksinimi, oksidatif denge mekanizmalarının önemini ortaya koymaktadır. Aerobik organizmalarda, yüksek yağ ve protein içeren diyetler, kirli gıdalar ve ultraviyole (UV) ışınlarına maruz kalma gibi dış faktörler, alınan oksijenin yaklaşık %5-10'unun serbest radikallere dönüşmesine neden olmaktadır. Normal metabolizma koşulları altında, üretilen bu serbest radikaller organizmanın endojen antioksidan sistemi tarafından etkisiz hale getirilmektedir. Ancak metabolik bozukluklar sonucu, antioksidan-oksidan dengesi bozulabilmekte ve bu durum, hücrelerde oksidatif stres olarak tanımlanan hücresel hasara yol açmaktadır. Bu moleküllerin fazlalığı, proteinlere, lipitlere ve nükleik asitler gibi biyomoleküllerde yapısal bozulmalara neden olarak insan sağlığını tehdit edebilmektedir. Oksidatif stres; tümör gelişimi, nörodejeneratif ve neoplastik hastalıkların yanı sıra kardiyovasküler ve sinir sistemindeki bozuklukların ortaya çıkmasına ve dejeneratif süreçlerin hızlanmasına neden olmaktadır. Reaktif oksijen türlerinin neden olduğu değişikliklere

karşı savunma mekanizması olarak, organizmalar bu moleküllerin aşırı üretimini engellemek ve onları inaktif türevlere dönüştürmek için çeşitli mekanizmalar geliştirmiştir. Bu mekanizmalar, hem ekzojen hem de endojen bileşiklere dayanan karmaşık bir antioksidan sistemi oluşturmakta ve hem enzimatik hem de enzimatik olmayan özellikler taşımaktadır. Enzimatik antioksidan bariyeri, katalaz (CAT), süperoksit dismutaz (SOD), glutatyon peroksidaz (GPx) ve glutatyon redüktaz gibi özel enzimlerden oluşmaktadır. İkinci savunma hattı ise, organizmaya besinlerle sağlanan enzimatik olmayan antioksidanları kapsamaktadır. Bu besin antioksidanları, serbest radikalleri "temizleyen" bileşiklerdir ve çeşitli mekanizmalar aracılığıyla serbest radikalleri doğrudan nötralize etmektedir. Ayrıca bu bileşikler; peroksit konsantrasyonlarını azaltır, oksitlenmiş zarlara onarır, reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini azaltmak için demiri bağlar ve kısa zincirli yağ asitleri ile serbest kolesterol esterlerinin metabolizması yoluyla ROS'u etkisiz hale getirir. Beslenme yoluyla yeterli düzeyde antioksidan alımı, kardiyovasküler hastalıklar, kanser, diyabet ve obezite gibi yaşam tarzı kaynaklı hastalıkların önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, organizmanın enfeksiyonlara karşı genel direncini artırmakta ve beyin fonksiyonlarının korunmasına katkı sağlamaktadır. Nitekim mevcut literatürdeki çeşitli araştırmalar, antioksidan takviyesi uygulanan bireylerde, Parkinson ve Alzheimer hastalığı gibi nörodejeneratif hastalıkların görülme sıklığının azaldığını bildirmektedir (Losada-Barreiro & Bravo-Diaz, 2017; Power, Jakeman, & FitzGerald, 2013). Süt ve süt ürünlerinin antioksidan kapasitesi, bünyesindeki antioksidanlar ve oksidanlar arasındaki dinamik ve kompleks denge tarafından belirlenmektedir. Buna ek olarak, süt ve süt ürünlerinde gerçekleşen oksidatif süreçler, yalnızca sütün raf ömrünü kısaltmakla kalmayıp, aynı zamanda duyu niteliklerini (örneğin, istenmeyen tat profili oluşumu) ve besin değerini de olumsuz yönde etkileyerek ürün kalitesini düşürmektedir.

(Havemose, Weisbjerg, Bredie, Poulsen, & Nielsen, 2006). Bununla birlikte, protein oksidasyonu, lipid oksidasyonundan bağımsız bir mekanizma ile gerçekleşebilmektedir Havemose, Weisbjerg, Bredie, and Nielsen (2004) bildirildiğine göre, yüksek antioksidan konsantrasyonları protein oksidasyonunun geç fazını uzatmak suretiyle oksidatif protein modifikasyonunu sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle, süt ürünlerinin kalitesini optimize etme hedefiyle, antioksidan aktiviteye sahip biyoaktif bileşenlerin düzeyinin artırılması kritik bir önem taşımaktadır. Antioksidan bileşikler, organizmanın immün savunma mekanizmalarını destekleyip güçlendirerek, bazı yaşam tarzı hastalıklarının önlenmesine önemli katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, bazı sentetik antioksidanların in vivo koşullarda potansiyel toksik etkiler oluşturabileceği de rapor edilmiştir (Lourenço, Moldão-Martins, & Alves, 2019). Bu nedenle, doğal kaynaklardan temin edilen antioksidan bileşikler, daha güvenilir ve biyolojik olarak değerli alternatifler olarak değerlendirilmektedir. Süt ve süt ürünleri, doğal antioksidan bileşenlerin önemli besinsel kaynakları arasında yer almaktadır. Süt tüketiminin yüksek olduğu coğrafi bölgelerde (örneğin Kuzey Amerika, Avrupa, Avustralya, Arjantin ve Pakistan), yıllık kişi başı tüketim hacmi 150 kilogramın üzerinde olup, süt ve süt ürünleri ortalama insan diyetinin yaklaşık %25 ila 30'luk bir dilimini teşkil etmektedir (Guha, Sharma, Deshwal, & Rao, 2021). Bu ürünlerdeki antioksidan bileşenler; protein fraksiyonlarında (β -laktoglobulin, laktoferrin), yağ fraksiyonlarında (A ve E vitaminleri, β -karoten) ve sulu fazda (C vitamini, Sn, Zn, Fe, Mn gibi mikro elementler) bulunmaktadır. (Stobiecka, Król, & Brodziak, 2022).

3. BİYOAKTİF SÜT BİLEŞENLERİNİN FİZYOLOJİK FONKSİYONLARI

Süt proteinlerinden türetilen başlıca biyoaktif bileşenler; β -Laktaglobulin (β -LG), Serum Albümini (BSA), İmmüoglobulinler (Ig), Glikomakropeptit (GMP), Laktoperoksidaz (LP), Lizozim, α -Laktalbumin (α -LA), Laktoferrin ile Kazein ve Serum Proteinlerinden türetilen biyoaktif peptitler olarak bilinmektedir. Bu bileşenler, hem besinsel hem de fizyolojik işlevleri bakımından büyük öneme sahiptir.

3.1. α -Laktalbumin (α -LA)

α -Laktalbumin (α -LA); peynir altı suyu proteininin önemli bir fraksiyonu olup, kendine özgü biyoaktif özelliklere sahip birçok proteinin önemli temel kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Peynir altı suyu fraksiyonunda yer alan başlıca proteinler arasında α -laktalbumin (α -Lac), laktoferrin ve glikomakropeptit en çok araştırılan bileşenlerdir. α -Laktalbumin, anne sütündeki toplam proteinin yaklaşık %22'sini ve peynir altı suyu proteininin yaklaşık %36'sını oluşturmaktadır. Suda çözünebilen bir protein olan α -Laktalbumin 129 amino asit kalıntısından meydana gelmekte ve özellikle triptofan, lizin, sistein ile dallı zincirli amino asitler açısından zengin bir profile sahiptir. Yüksek biyoyararlılığı (biyolojik değeri) sayesinde bu protein, büyüme ve gelişimi desteklemesinin yanı sıra; uyku kalitesi, ruhsal durum, gastrointestinal fonksiyonlar, mineral absorpsiyonu ve immün sistem üzerinde çeşitli olumlu biyolojik etkilere sahiptir (Auestad & Layman, 2021). Ayrıca α -Laktalbumin, laktoferrin ve immüoglobulinler gibi diğer peynir altı suyu proteinleriyle birlikte hücre gelişimi, hücre hareketliliği ve antimikrobiyal aktivite gibi önemli fizyolojik süreçlerde rol almaktadır. α -Laktalbumin'in biyoaktivitesinin, triptofan metabolizması yoluyla serotonin üretimi, sistein aracılığıyla

antioksidan glutasyon sentezi ve ince bağırsakta tripsin aracılı sindirim sonucu oluşan disülfüd köprüleriyle bağlantılı pentapeptitlerin (örneğin glisil-lösil-fenilalanin içeren peptitlerin) oluşumu ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Hayvan deneyleri ve hücre kültürü çalışmalarında, bu peptitlerin antibakteriyel aktiviteye sahip oldukları bildirilmiştir (Madureira, Tavares, Gomes, Pintado, & Malcata, 2010; Pellegrini, Thomas, Bramaz, Hunziker, & von Fellenberg, 1999). Ancak, söz konusu peptitlerin insan gastrointestinal sistemindeki fizyolojik işlevleri henüz tam olarak aydınlatılamamıştır (Auestad & Layman, 2021).

3.2. Laktoferrin

Laktoferrin, anne sütünde α -Laktalbuminden sonra en yüksek konsantrasyonda bulunan ikinci proteindir. Yaklaşık 690 amino asit kalıntısından oluşan bu glikoprotein, memeliler arasında evrimsel olarak oldukça korunmuş bir yapıya sahiptir. Laktoferrin, iki metal bağlama bölgesi sayesinde demir iyonlarına yüksek afinite ile bağlanabilmekte; ayrıca bakır, çinko ve manganez gibi diğer eser elementlerle de etkileşime girebilmektedir. Anne sütü üzerine yapılan öncül araştırmalar, laktoferrinin yenidoğanlarda gastrointestinal yol aracılığıyla demir emilimini artırdığını ortaya koymuştur. Yapılan çalışmalar ise laktoferrinin bakterisidal aktivitesinin yalnızca demir bağlama özelliğinden değil, aynı zamanda bakteri hücre zarlarıyla doğrudan etkileşiminden de kaynaklanabileceğini göstermiştir. Laktoferrin, bakteri hücre yüzeyindeki lipopolisakkaritlerle etkileşime girerek dış zar bütünlüğünü bozmakta; bu durum, lizozim aktivitesi ile birlikte hücre zarının geçirgenliğini artırarak nihayetinde hücre hasarına yol açmaktadır (Conneely, 2001). Bunun yanı sıra laktoferrin, bağırsak mukozasında bulunan enterositlere bağlanarak hücre proliferasyonunu desteklemekte ve inflamatuvar süreçleri azaltmaktadır. İn vivo şartlarda yapılan araştırmalar, laktoferrinin proinflamatuvar sitokinlerin (TNF- α , IL-1 β ve IL-6) üretimini baskıladığını göstermiştir (Lönnerdal,

2009). Genel olarak, laktoferrinin, hem infantlarda hem de risk altındaki bireylerde demir durumunu iyileştirdiği ve bakteriyel enfeksiyonlar ile inflamasyonla ilişkili patolojik durumlarda potansiyel terapötik etkilere sahip olduğu rapor edilmektedir (Auestad & Layman, 2021)

3.3. Kazeinler

Kazeinler, sütte bulunan ana protein fraksiyonunu oluşturmakta olup hem besinsel değerleri hem de fonksiyonel özellikleri nedeniyle uzun süredir yoğun araştırmalara konu olmaktadır. "Kazein" terimi, kökenini Latince *caseus* (peynir) kelimesinden almakta olup, bu proteinin peynir üretimindeki tarihsel önemini net bir biçimde yansıtmaktadır (Runthala, Mbye, Ayyash, Xu, & Kamal-Eldin, 2023). Kazein açısından zengin süt ürünleri, artan tokluk hissi, iyileştirilmiş besin değeri ve kas fonksiyonlarının korunması gibi çeşitli terapötik faydalar ile ilişkilendirilmektedir (Auestad & Layman, 2021; Jiménez-Barrios et al., 2023). Buna ek olarak, kazeinler ve bunlardan türetilen bileşikler, gıda endüstrisinde emülsiyonlar, köpükler ve nanopartiküller gibi kompleks sistemlerde stabilize edici veya taşıyıcı ajanlar olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Gebhardt, Hohn, & Asaduzzaman, 2024; Treweek, 2012). Kazeinlerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, enzimatik hidroliz, mikrobiyal fermentasyon veya gastrointestinal sindirim süreçleri neticesinde biyoaktif peptitlerim açığa çıkmasını sağlayabilmektir Bu açıdan kazeinler, yalnızca besin kaynağı değil aynı zamanda önemli biyolojik potansiyele sahip "gizli" biyoaktif peptitlerin bir rezervuarı olarak değerlendirilmektedir (Huppertz, Fox, & Kelly, 2018). Kazein türevi peptitler (CDP'ler), hem insan hem de hayvan sağlığı üzerinde faydalı etkiler gösterebilen geniş bir biyoaktivite yelpazesine sahiptir. Bu peptitlerin; antimikrobiyal, antihipertansif, opioid benzeri ve immünomodülatör etkiler dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik fonksiyonlar sergilediği rapor edilmektedir (Fitzgerald & Murray, 2006). Söz konusu bu

biyolojik etkilerin çeşitliliği, kazein proteinlerinin belirli amino asit dizilerinde yer alan ve enzimatik hidroliz sonucu serbest kalan bölgelere bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu diziler, organizmadaki farklı moleküler hedeflerle etkileşime girerek spesifik biyolojik aktivitelerin gelişimine aracılık etmektedir. Kazeinden türetilen biyoaktif peptitlerin temel biyolojik aktiviteleri ve potansiyel uygulama alanları **Şekil 3**'te görselleştirilmiştir (Moita, Pedroso, Santos, & Lima, 2025).



Şekil 3. Kazein türevi biyoaktif peptitler için farklı olası uygulamalar

Bununla birlikte, süt ve süt ürünlerinde bulunan lipit kaynaklı biyoaktif bileşenler başlıca çoklu doymamış yağ asitleri, fosfolipitler, steroidler ve melatonin olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, mineraller, vitaminler ve antioksidan bileşikler de süt matrisinde yer alan ve önemli biyolojik işlevler üstlenen diğer biyoaktif bileşen gruplarını oluşturmaktadır.

4. FERMENTE SÜT ÜRÜNLERİNDE BİYOAKTİF PEPTİTLERİN OLUŞUMU VE FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

Süt ve süt ürünlerinin işlenmesi esnasında, süt proteinlerinde çeşitli fizikokimyasal modifikasyonlar meydana gelebilmektedir. Uygulanan işlem koşullarına bağlı olarak, peynir altı suyu proteinleri ve/veya kazein üzerinde denatürasyon, agregasyon, glikasyon, oksidasyon, çapraz bağlanma, rasemizasyon ve defosforilasyon gibi yapısal değişimler gözlemlenebilmektedir. Bununla birlikte, tanımlayıcı çalışmalar, in vitro sindirim modelleri, in vivo modelleri ve sınırlı sayıda insan klinik denemesi üzerine yapılan sistematik bir derleme, süt işleme sürecinde uygulanan ısı işlemlerin, süt proteinlerinin sindirilebilirliği veya biyoyararlanımı üzerinde genel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığını ortaya koymuştur (Lacroix et al., 2008; van Lieshout, Lambers, Bragt, & Hettinga, 2020).

Benzer şekilde, in vitro ve in vivo modelleri kullanılarak yürütülen araştırmalar, süt proteini denatürasyonunun genel protein sindirilebilirliği üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, glikasyonun süt proteinlerinin sindirilebilirliğini ve amino asit biyoyararlanımını azalttığı rapor edilmiştir (van Lieshout et al., 2020). Diğer işleme etkileri üzerine yürütülen araştırmalar ise çoğunlukla tanımlayıcı düzeyde kalmakta ve klinik validasyon (doğrulama) açısından sınırlı veriler sunmaktadır. Süt işleme süreçlerinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendiren klinik çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır (Fatih, Barnett, Gillies, & Milan, 2021; Trommelen et al., 2020). Buna karşın, endüstriyel ve regülatif (düzenleyici) standartlara uygun olarak üretilen süt ve süt ürünlerine ilişkin çok sayıda araştırma, süt proteinlerinin yüksek besinsel kalitesini ve insan sağlığı üzerindeki faydalı etkilerini uzun süredir ortaya koymaktadır (Auestad & Layman, 2021)

Biyoaktif peptitler, süt ve süt ürünlerinin gastrointestinal sistemden geçişi sırasında, sindirim enzimlerinin veya laktik asit bakterilerinin fermentasyon sürecinde proteolitik aktiviteleri sonucu süt proteinlerinin hidrolizi (parçalanması) ile oluşan sağlık üzerinde çeşitli olumlu etkiler gösteren bileşiklerdir. Bu peptitler yalnızca besleyici özellikleriyle değil, aynı zamanda hormon benzeri etki mekanizmalarıyla organizmada düzenleyici roller üstlenmeleriyle de dikkat çekmektedirler (Fardet, Dupont, Rioux, & Turgeon, 2019). Bir bileşiğin biyoaktif olarak tanımlanabilmesi için, fizyolojik konsantrasyonlarda gözlemlenebilir bir biyolojik etki göstermesi ve alerjenite, mutajenite veya toksisite gibi istenmeyen etkiler oluşturmada sağlık üzerinde yararlı sonuçlar sağlaması gerekmektedir(Gholami et al., 2017).

Biyoaktif peptitlerin sağlık üzerindeki etkileri, fagositoz aktivitesinin artışı, antikor üretiminin simülasyonu, makrofaj sitotoksik aktivitenin güçlenmesi, lenfosit proliferasyonu, T-lenfosit regülasyonu ve hücre öldürücü aktivitenin desteklenmesi gibi mekanizmalar aracılığıyla immün sistemin modülasyonunu kapsamaktadır. Ayrıca bu bileşikler, serbest radikalleri temizleyerek oksidatif stresi azaltmaları; damar tıkanıklığı ve kardiyovasküler hastalıkların profilaksisine katkı sağlamaları; gastrik boşalma ve intestinal hareketliliği azaltarak antidiyareal etki göstermeleri; kolesterol ve kan basıncını düşürmeleri; sinir sistemi üzerinde opioid benzeri etkiler oluşturmaları; antitrombotik ve antioksidan aktiviteler sergilemeleri; immün sistemi düzenlemeleri; antimikrobiyal özellik sergilemeleri ve mineral absorpsiyonu ile biyoyararlanımını artırmaları bakımından da kritik öneme sahiptir (Raveschot et al., 2018). Biyokimyasal düzeyde incelendiğinde, biyoaktif peptitlerin; intestinal ortamda (bağırsakta) zararlı bileşiklerin eliminasyonunda (uzaklaştırılmasında), fermentasyon süreçlerinde işlevsel bileşen olarak, patojen bakterilere karşı

inhibitör, enzimatik reaksiyonlarda kofaktör veya inhibitör ve ayrıca toksik bileşikler için yakalayıcı ajan olarak görev üstlendikleri saptanmıştır (Van Hekken, Tunick, Ren, & Tomasula, 2017). Söz konusu biyolojik aktiviteler üzerinde, amino asit sekansının ve kompozisyonunun belirleyici bir rol oynadığı rapor edilmiştir.

Fermente süt ürünleri, özellikle yoğurt ve peynir olmak üzere sütün muhafazasını, taşınabilirliğini geliştirilmesini, raf ömrünün artırılmasının yanı sıra laktozun hidrolizi yoluyla sindirilebilirliğini de geliştirmektedir. Bu ürünlerin, gıda alerjilerini hafifletici ve LDL kolesterol seviyesini düşürücü etkiler gösterdiği rapor edilmektedir (Gigli, 2016). Fermantasyon süreci sırasında oluşan immün düzenleyici peptitlerin, antitümör aktivite sergiledikleri ve bağışıklık sistemi üzerinde regülatif (düzenleyici) etkiler oluşturdukları bildirilmiştir. Fermente süt ürünlerinin üretiminde kullanılan starter kültür bakterileri, özellikle proteolitik aktiviteye sahip türler, biyoaktif peptit oluşumunda kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreçte fermentasyon koşulları ve kullanılan kültür tipi belirleyici öneme sahiptir. Örneğin, pH değerinin 3,5'e kadar düşmesiyle fermente sütteki ACE inhibitör aktivitesinde belirgin bir yükseliş gözlenmiştir. Bu artışta, hem doğada hem de insan sindirim sisteminde doğal olarak bulunan laktik asit bakterilerinin, biyoaktif peptit üretimindeki etkisi önemli rol oynamaktadır (Singh, Vij, & Hati, 2014). Türkiye'de yaygın olarak tüketilen fermente süt ürünleri olan yoğurt ve kefir üzerinde yapılan çalışmalarda da çok sayıda ACE inhibitör peptit tanımlanmıştır (Rodríguez-Figueroa, González-Córdova, Torres-Llanez, Garcia, & Vallejo-Cordoba, 2012). Tüm bu bulgular, süt proteinlerinin biyoaktif peptitler açısından en önemli kaynaklardan biri olduğunu göstermektedir. Süt proteinlerinden türetilen biyoaktif peptitlerin kaynakları ve sergiledikleri biyolojik aktiviteler Tablo 1'de özetlenmiştir (Yangılar, 2020).

Ekşi süt ve İsviçre peyniri gibi fermente ürünlerin, IPP (Izoleusin-Prolin-Prolin) ve VPP (Valin-Prolin-Prolin) gibi ACE (Anjiyotensin Dönüştürücü Enzim) inhibitörü lakto-tri-peptitleri içerdikleri belirlenmiştir. Bu peptitler, β -kazein ve κ -kazeinin hidroliz ürünleri olarak tanımlanmakta olup, antihipertansif etki göstermektedir. Ayrıca, yağsız süttten üretilen ve *Lactobacillus helveticus* ile *Saccharomyces cerevisiae* tarafından fermente edilen bir Japon menşeli bir içecek olan Calpis'in, düzenli tüketiminin antihipertansif etkiler oluşturduğu da bildirilmiştir (Murakami et al., 2004).

Çeşitli peynir tipleri ve fermente süt, laboratuvar ortamında ve endüstriyel ölçekte maya ve kültür kullanılarak üretilmektedir. Bu ürünlerinin, insanlarda antihipertansif aktivite sergilediği bildirilmektedir (H Korhonen & Pihlanto, 2007). Peynirlerde, ACE inhibitör özelliklere sahip biyoaktif peptitlerin, β -kazomorfinlerin ve kalsiyum bağlayıcı fosfopeptitlerin tanımlandığı daha önceki çalışmalarla rapor edilmiştir. Üretim sürecinde pH, tuz konsantrasyonu ve kullanılan enzim türü gibi çeşitli faktörler, peptitlerin mide ortamında stabilitesini etkileyebilmektedir. Örneğin, β -kazomorfin normal koşullar altında cheddar peyniri üretimi esnasında hidrolize uğradığı belirlenmiştir (Gómez-Ruiz, Recio, & Belloque, 2004). Ticari olarak temin edilen olgunlaştırılmış (eskitilmiş) ve taze peynirler, hafif ACE inhibitör aktivite sergilediği, bu aktivitenin pepsin ve Corolase PP (esas olarak tripsin ve kimotripsin aktiviteleri gösteren ve domuz pankreasından elde edilen bir enzim karışımıdır) ile simüle edilen gastrointestinal sindirim sonrasında korunduğu veya arttığı rapor edilmiştir. Peynirin olgunlaşma (matürasyon) süreci boyunca, farklı biyolojik aktivitelere sahip çok sayıda biyoaktif peptit formasyonu (oluşumu) gerçekleşmektedir (Aslam et al., 2022). Keçi sütünden üretilen peynirler üzerine yürütülen güncel araştırmalar da, bu ürünlerin ACE inhibitör peptitler açısından önemli bir kaynak olduğunu

ortaya koymaktadır (Atanasova et al., 2021; Kocak, Sanli, Anli, & Hayaloglu, 2020).

Tablo 1. Peynir altı suyu proteinlerinden elde edilen biyoaktif peptitler (Park YoungWoo & Nam MyoungSoo, 2015).

Öncü protein	Parça	Peptit dizisi	İsim	İşlev
α -Laktalbümin	50-53	Tyr-Gly-Leu-Phe	α -Laktorfin	Opioid agonisti ACE inhibisyonu
α -Laktoglobulin	102-105	Tyr-Leu-Leu-Phe	β -Laktorfin	İleum üzerinde opioid olmayan uyarıcı etki
142-148	Ala-Leu-Pro-Met-His-Ile-Arg	-	ACE inhibisyonu	
146-149	His-Ile-Arg-Leu	β -Laktotensin	İleum kasılması	
Sığır serum albümini	399-404	Tyr-Gly-Phe-Gln-Asp-Ala	Serorfin	Opioid
208-216	Ala-Leu-Lys-Ala-Trp-Tyr-Gly-Phe-Gln-Asp-Ala	Albutensin A	İleum kasılması, ACE inhibisyonu	
Laktoferrin	17-42	Lys-Cys-Arg-Arg-Trp-Glu-Trp-Arg-Met-Lys-Lys-Leu-Gly-Ala-Pro-Ser-Ile-Thr-Cys-Val-Arg-Arg-Ala-Phe	Laktoferrisin	Antimikrobiyal

5. PEYNİR ALTI SUYU PROTEİNLERİNDEN TÜRETİLEN BİYOAKTİF PEPTİTLER

Peynir altı suyu proteinlerinden türetilen çok sayıda biyoaktif peptitler tanımlanmıştır. Bu peptitler arasında α -

laktorfin, β -laktotensin, serorfin, albutensin A ve laktoferrisin yer almaktadır (**Tablo 1**). Bazı peynir altı suyu proteinlerinin, zayıf opioid aktiviteye sahip biyoaktif peptitler içerdiği de bilinmektedir. Örneğin; serorfin serum albümin fraksiyonundan, albutensin A serum albümininden, laktoferoksin, laktoferrinden ve laktotensin ise β -laktoglobulin protein hidrolizinden elde edilmektedir (Park YoungWoo & Nam MyoungSoo, 2015). Bu peptitlerin, antimikrobiyal, antioksidan, opioid benzeri ve immün modülatör etkiler gibi çeşitli biyolojik aktiviteler sergiledikleri bildirilmektedir. Özellikle laktoferrinden türetilen laktoferrisin, güçlü antimikrobiyal etki göstermesi nedeniyle fonksiyonel gıda ve farmasötik uygulamalarda dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, α -laktorfin ve β -laktotensin gibi peptitlerin, kan basıncının düzenlenmesi ve stres yanıtının modülasyonu gibi nörofizyolojik etkilerinin olduğu da çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur. Bu peptitlerin antihipertansif, antimikrobiyal, antioksidan ve immün düzenleyici özellikler sergilediği çeşitli araştırmalarla desteklenmiştir (Korhonen ve Pihlanto, 2006; Power et al., 2013). Laktoferrisin, laktoferrinden tripsin veya pepsin gibi enzimlerle hidroliz sonucu elde edilen güçlü bir antimikrobiyal peptittir. Gram pozitif ve Gram negatif bakterilere karşı etkinliği kanıtlanmış olup, antiviral ve antitümör aktiviteler de sergilemektedir (González-Chávez et al., 2009). Dolayısıyla, peynir altı suyu proteinlerinden türetilen biyoaktif peptitler, hem gıda teknolojisi hem de fonksiyonel beslenme açısından önemli potansiyele sahip bileşikler olarak değerlendirilmektedir.

6. SONUÇ

Biyoaktif peptitler, süt, et ve tahıl gibi gıda proteinlerinin sindirim, hidroliz veya fermentasyon süreçleri sonucunda açığa çıkan yalnızca besinsel değil, aynı zamanda fizyolojik düzeyde de sağlık üzerine olumlu yönde etkiler gösteren fonksiyonel

bileşenler olarak tanımlanmaktadır. Bu peptitler, antioksidan, antihipertansif (ACE inhibitörü), antidiyabetik (DPP-IV inhibitörü) ve immünomodülatör gibi geniş bir biyolojik aktivite spektrumu sergileyerek, hücresel düzeyde etki göstermekte ve kronik hastalık riskini azaltma potansiyeli sunmaktadır. Hücresel düzeyde etki gösteren bu bileşiklerin, oksidatif stresin azaltılması, kan basıncının düzenlenmesi ve metabolik bozuklukların önlenmesi yoluyla kronik hastalıkların riskini azaltma potansiyeline sahip oldukları bildirilmektedir. Günümüzde tüketicilerin doğal ve katkısız ve sağlığı destekleyici gıdalara yönelik artan talebi, biyoaktif peptitlerin fonksiyonel gıdalarda ve nutrasötik ürünlerde kullanımına yönelik bilimsel araştırmaları önemli ölçüde hızlandırmıştır.

Özellikle süt, içerdiği Laktoferrin, α -Laktalbumin ve Kazeinler gibi yüksek biyolojik değere sahip proteinler sayesinde biyoaktif peptitlerin en önemli kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu proteinler, bağışıklık sistemi ve gastrointestinal fonksiyonlar üzerinde faydalı etkiler gösteren "gizli" peptit rezervuarlarıdır. Söz konusu peptitler, bağışıklık sistemi, kardiyovasküler sağlık ve gastrointestinal fonksiyonlar üzerinde düzenleyici etkiler göstermektedir (Hernández-Ledesma, 2017). Fermente süt ürünleri (örneğin yoğurt, peynir), laktik asit bakterilerinin proteolitik enzim aktivitesi biyoaktif peptit üretimi açısından doğal bir biyoteknolojik platform oluşturmaktadır. Bu süreçlerde, IPP (İzoleusin–Prolin–Prolin) ve VPP (Valin–Prolin–Prolin) gibi güçlü ACE inhibitörü lakto-tri-peptitlerin yoğun olarak üretildiği doğal platformlardır. Bu durum fermente süt ürünlerinin yalnızca besleyici değil, aynı zamanda kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi açısından da fonksiyonel bir gıda kategorisi olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Muguruma et al., 2016; Atanasova ve Dalgallarrondo, 2021).

Sonuç olarak, biyoaktif peptitlerin izolasyonu, karakterizasyonu ve ticarileştirilmesi, farmakolojik olmayan tedavi yaklaşımlarını destekleyen, güvenilir, doğal ve yüksek biyoyararlanıma sahip fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesinde stratejik bir potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abdel-Hamid, M., Otte, J., De Gobba, C., Osman, A., & Hamad, E. (2017). Angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity and antioxidant capacity of bioactive peptides derived from enzymatic hydrolysis of buffalo milk proteins. *International Dairy Journal*, 66, 91–98.
- Al Khawli, F., Martí-Quijal, F. J., Ferrer, E., Ruiz, M.-J., Berrada, H., Gavahian, M., . . . de La Fuente, B. (2020). Aquaculture and its by-products as a source of nutrients and bioactive compounds. In *Advances in food and nutrition research* (Vol. 92, pp. 1–33): Elsevier.
- Arslaner, A., & Salık, M. A. (2019). Sütün fonksiyonel nitelikli biyoaktif bileşenleri. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 12(1), 124–135.
- Aslam, M., Firdos, S., Zhousi, L., Wang, X., Liu, Y., & Qin, X. (2022). Managing hypertension by exploiting microelements and fermented dairy products. *CyTA-Journal of Food*. 2022; 20 (1): 327-342. In.
- Atanasova, J., Dalgarrondo, M., Iliev, I., Moncheva, P., Todorov, S. D., & Ivanova, I. V. (2021). Formation of free amino acids and bioactive peptides during the ripening of Bulgarian white brined cheeses. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 13(1), 261–272.
- Auestad, N., & Layman, D. K. (2021). Dairy bioactive proteins and peptides: a narrative review. *Nutrition Reviews*, 79(Supplement_2), 36–47.
- Bhandari, D., Rafiq, S., Gat, Y., Gat, P., Waghmare, R., & Kumar, V. (2020). A review on bioactive peptides: physiological functions, bioavailability and safety. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 26(1), 139–150.

- Castañeda-Pérez, E., Jiménez-Morales, K., Castellanos-Ruelas, A., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2021). Antidiabetic potential of protein hydrolysates and peptide fractions from lima bean (*Phaseolus lunatus* L): An in vitro study. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 27(3), 1979–1988.
- Chakrabarti, S., Guha, S., & Majumder, K. (2018). Food-derived bioactive peptides in human health: Challenges and opportunities. *Nutrients*, 10(11), 1738.
- Chalamaiah, M., Ulug, S. K., Hong, H., & Wu, J. (2019). Regulatory requirements of bioactive peptides (protein hydrolysates) from food proteins. *Journal of Functional Foods*, 58, 123–129.
- Chandrashekar, S., Vijayakumar, R., Chelliah, R., & Oh, D.-H. (2020). Identification and purification of potential bioactive peptide of *Moringa oleifera* seed extracts. *Plants*, 9(11), 1445.
- Conneely, O. M. (2001). Antiinflammatory activities of lactoferrin. *Journal of the American College of Nutrition*, 20(sup5), 389S–395S.
- Cotabarren, J., Rosso, A. M., Tellechea, M., García-Pardo, J., Rivera, J. L., Obregón, W. D., & Parisi, M. G. (2019). Adding value to the chia (*Salvia hispanica* L.) expeller: Production of bioactive peptides with antioxidant properties by enzymatic hydrolysis with Papain. *Food Chemistry*, 274, 848–856.
- de Castro, R. J. S., & Sato, H. H. (2015). A response surface approach on optimization of hydrolysis parameters for the production of egg white protein hydrolysates with antioxidant activities. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(1), 55–62.

- Elisha, C., Bhagwat, P., & Pillai, S. (2025). Emerging production techniques and potential health promoting properties of plant and animal protein-derived bioactive peptides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(24), 4729–4758.
- Fardet, A., Dupont, D., Rioux, L.-E., & Turgeon, S. L. (2019). Influence of food structure on dairy protein, lipid and calcium bioavailability: A narrative review of evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(13), 1987–2010.
- Fatih, M., Barnett, M. P., Gillies, N. A., & Milan, A. M. (2021). Heat treatment of milk: a rapid review of the impacts on postprandial protein and lipid kinetics in human adults. *Frontiers in Nutrition*, 8, 643350.
- Fitzgerald, R. J., & Murray, B. A. (2006). Bioactive peptides and lactic fermentations. *International Journal of Dairy Technology*, 59(2), 118–125.
- Gebhardt, R., Hohn, C., & Asaduzzaman, M. (2024). Stabilizing interactions of casein microparticles after a thermal post-treatment. *Food Chemistry*, 450, 139369.
- Gholami, F., Khoramdad, M., Esmailnasab, N., Moradi, G., Nouri, B., Safiri, S., & Alimohamadi, Y. (2017). The effect of dairy consumption on the prevention of cardiovascular diseases: A meta-analysis of prospective studies. *Journal of cardiovascular and thoracic research*, 9(1), 1.
- Gigli, I. (2016). *Milk proteins: From structure to biological properties and health aspects*: BoD–Books on Demand.
- Gobbetti, M., Minervini, F., & Rizzello, C. G. (2007). Bioactive peptides in dairy products. *Handbook of food products manufacturing*, 489–517.

- Gómez-Ruiz, J. A., Recio, I., & Belloque, J. (2004). ACE-Inhibitory activity and structural properties of peptide Asp-Lys-Ile-His-Pro [β -CN f (47– 51)]. Study of the peptide forms synthesized by different methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(20), 6315–6319.
- Göksu, A. G., Çakır, B., & Gülseren, İ. (2022). Hazelnut peptide fractions preserve their bioactivities beyond industrial manufacture and simulated digestion of hazelnut cocoa cream. *Food Research International*, 161, 111865.
- Guha, S., Sharma, H., Deshwal, G. K., & Rao, P. S. (2021). A comprehensive review on bioactive peptides derived from milk and milk products of minor dairy species. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3(1), 2.
- Havemose, M., Weisbjerg, M. R., Bredie, W., Poulsen, H. D., & Nielsen, J. H. (2006). Oxidative stability of milk influenced by fatty acids, antioxidants, and copper derived from feed. *Journal of dairy science*, 89(6), 1970–1980.
- Havemose, M., Weisbjerg, M. R., Bredie, W. L., & Nielsen, J. H. (2004). Influence of feeding different types of roughage on the oxidative stability of milk. *International Dairy Journal*, 14(7), 563–570.
- Huppertz, T., Fox, P., & Kelly, A. (2018). The caseins: Structure, stability, and functionality. In *Proteins in food processing* (pp. 49–92): Elsevier.
- Jiang, X., Cui, Z., Wang, L., Xu, H., & Zhang, Y. (2020). Production of bioactive peptides from corn gluten meal by solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* MTCC5480 and evaluation of its antioxidant capacity in vivo. *Lwt*, 131, 109767.
- Jiménez-Barrios, P., Sánchez Rivera, L., Martínez-Maqueda, D., Le Gouar, Y., Dupont, D., Miralles, B., & Recio, I. (2023).

Supplementary Materials for Peptidomic characterization and amino acid availability after intake of casein vs. a casein hydrolysate in a pig model.

- Kashung, P., & Karuthapandian, D. (2025). Milk-derived bioactive peptides. *Food Production, Processing and Nutrition*, 7(1), 6.
- Kitts, D. D., & Weiler, K. (2003). Bioactive proteins and peptides from food sources. Applications of bioprocesses used in isolation and recovery. *Current pharmaceutical design*, 9(16), 1309–1323.
- Kocak, A., Sanli, T., Anli, E. A., & Hayaloglu, A. A. (2020). Role of using adjunct cultures in release of bioactive peptides in white-brined goat-milk cheese. *Lwt*, 123, 109127.
- Korhonen, H., & Pihlanto-Leppälä, A. (2004). Milk-derived bioactive peptides: Formation and prospects for health promotion. *Handbook of functional dairy products*, 109–124.
- Korhonen, H., & Pihlanto, A. (2007). Technological options for the production of health-promoting proteins and peptides derived from milk and colostrum. *Current pharmaceutical design*, 13(8), 829–843.
- Kris-Etherton, P. M., Hecker, K. D., Bonanome, A., Coval, S. M., Binkoski, A. E., Hilpert, K. F., . . . Etherton, T. D. (2002). Bioactive compounds in foods: their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. *The American journal of medicine*, 113(9), 71–88.
- Lacroix, M., Bon, C., Bos, C., Léonil, J., Benamouzig, R., Luengo, C., . . . Gaudichon, C. (2008). Ultra high temperature treatment, but not pasteurization, affects the postprandial kinetics of milk proteins in humans. *The Journal of nutrition*, 138(12), 2342–2347.

- Losada-Barreiro, S., & Bravo-Diaz, C. (2017). Free radicals and polyphenols: The redox chemistry of neurodegenerative diseases. *European journal of medicinal chemistry*, 133, 379–402.
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2019). Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. *Molecules*, 24(22), 4132.
- Lönnerdal, B. (2009). Nutritional roles of lactoferrin. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 12(3), 293–297.
- Madureira, A., Tavares, T., Gomes, A., Pintado, M., & Malcata, F. X. (2010). Invited review: physiological properties of bioactive peptides obtained from whey proteins. *Journal of dairy science*, 93(2), 437–455.
- Mahdavi Yekta, M., Nouri, L., Azizi, M. H., Karimi Dehkordi, M., Mohammadi, M., Jabbari, M., . . . Mousavi Khaneghah, A. (2020). Peptide extracted from quinoa by pepsin and alcalase enzymes hydrolysis: Evaluation of the antioxidant activity. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), e14773.
- Moita, T., Pedroso, L., Santos, I., & Lima, A. (2025). Casein and Casein-Derived Peptides: Antibacterial Activities and Applications in Health and Food Systems. *Nutrients*, 17(10), 1615.
- Murakami, M., Tonouchi, H., Takahashi, R., Kitazawa, H., Kawai, Y., Negishi, H., & Saito, T. (2004). Structural analysis of a new anti-hypertensive peptide (β -lactosin B) isolated from a commercial whey product. *Journal of dairy science*, 87(7), 1967–1974.
- Park YoungWoo, P. Y., & Nam MyoungSoo, N. M. (2015). Bioactive peptides in milk and dairy products: a review.

- Park, Y. W. (2009a). Bioactive components in goat milk. *Bioactive components in milk and dairy products*, 4381, 43–81.
- Park, Y. W. (2009b). *Bioactive components in milk and dairy products*: John Wiley & Sons.
- Pellegrini, A., Thomas, U., Bramaz, N., Hunziker, P., & von Fellenberg, R. (1999). Isolation and identification of three bactericidal domains in the bovine α -lactalbumin molecule. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1426(3), 439–448.
- Power, O., Jakeman, P., & FitzGerald, R. (2013). Antioxidative peptides: enzymatic production, in vitro and in vivo antioxidant activity and potential applications of milk-derived antioxidative peptides. *Amino acids*, 44(3), 797–820.
- Raveschot, C., Cudennec, B., Coutte, F., Flahaut, C., Fremont, M., Drider, D., & Dhulster, P. (2018). Production of bioactive peptides by *Lactobacillus* species: from gene to application. *Frontiers in microbiology*, 9, 2354.
- Rodríguez-Figueroa, J., González-Córdova, A., Torres-Llanez, M., Garcia, H., & Vallejo-Cordoba, B. (2012). Novel angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides produced in fermented milk by specific wild *Lactococcus lactis* strains. *Journal of dairy science*, 95(10), 5536–5543.
- Runthala, A., Mbye, M., Ayyash, M., Xu, Y., & Kamal-Eldin, A. (2023). Caseins: versatility of their micellar organization in relation to the functional and nutritional properties of milk. *Molecules*, 28(5), 2023.
- Sarmadi, B. H., & Ismail, A. (2010). Antioxidative peptides from food proteins: A review. *Peptides*, 31(10), 1949–1956.

- Singh, B. P., Vij, S., & Hati, S. (2014). Functional significance of bioactive peptides derived from soybean. *Peptides*, 54, 171–179.
- Stobiecka, M., Król, J., & Brodziak, A. (2022). Antioxidant activity of milk and dairy products. *Animals*, 12(3), 245.
- Sutopo, C. C., Sutrisno, A., Wang, L.-F., & Hsu, J.-L. (2020). Identification of a potent Angiotensin-I converting enzyme inhibitory peptide from Black cumin seed hydrolysate using orthogonal bioassay-guided fractionations coupled with in silico screening. *Process Biochemistry*, 95, 204–213.
- Treweek, T. M. (2012). Alpha-casein as a molecular chaperone. *Milk protein*, 85–119.
- Trommelen, J., Weijzen, M. E., van Kranenburg, J., Ganzevles, R. A., Beelen, M., Verdijk, L. B., & van Loon, L. J. (2020). Casein protein processing strongly modulates post-prandial plasma amino acid responses in vivo in humans. *Nutrients*, 12(8), 2299.
- Udenigwe, C. C., & Fogliano, V. (2017). Food matrix interaction and bioavailability of bioactive peptides: Two faces of the same coin? *Journal of Functional Foods*, 35, 9–12.
- Ulug, S. K., Jahandideh, F., & Wu, J. (2021). Novel technologies for the production of bioactive peptides. *Trends in food science & technology*, 108, 27–39.
- Uraipong, C., & Zhao, J. (2018). In vitro digestion of rice bran proteins produces peptides with potent inhibitory effects on α -glucosidase and angiotensin I converting enzyme. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2), 758–766.
- Van Hekken, D., Tunick, M., Ren, D., & Tomasula, P. (2017). Comparing the effect of homogenization and heat

- processing on the properties and in vitro digestion of milk from organic and conventional dairy herds. *Journal of dairy science*, 100(8), 6042–6052.
- van Lieshout, G. A., Lambers, T. T., Bragt, M. C., & Hettinga, K. A. (2020). How processing may affect milk protein digestion and overall physiological outcomes: A systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2422–2445.
- Wang, Q., Chen, R., Zhang, C., Piao, F., & Shi, X. (2019). NGF protects bone marrow mesenchymal stem cells against 2, 5-hexanedione-induced apoptosis in vitro via Akt/Bad signal pathway. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 457(1), 133–143.
- Wang, R., Zhao, H., Pan, X., Orfila, C., Lu, W., & Ma, Y. (2019). Preparation of bioactive peptides with antidiabetic, antihypertensive, and antioxidant activities and identification of α -glucosidase inhibitory peptides from soy protein. *Food science & nutrition*, 7(5), 1848–1856.
- Xu, Q., Hong, H., Wu, J., & Yan, X. (2019). Bioavailability of bioactive peptides derived from food proteins across the intestinal epithelial membrane: A review. *Trends in food science & technology*, 86, 399–411.
- Yan, J., Zhao, J., Yang, R., & Zhao, W. (2019). Bioactive peptides with antidiabetic properties: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 1909–1919.
- Yang, Q., Cai, X., Huang, M., & Wang, S. (2020). A specific peptide with immunomodulatory activity from *Pseudostellaria heterophylla* and the action mechanism. *Journal of Functional Foods*, 68, 103887.

Yangilar, F. (2020). Fermente Süt Ürünlerinin Biyoaktif Bileşikler Açısından Değerlendirilmesi. *Journal of Literature Pharmacy Sciences*, 9(2), 109–115.

TAGUCHI-BASED RECENT APPLICATIONS IN FOOD PROCESSING

Mehmet GÜLDANE¹

1. INTRODUCTION

A significant amount of scientific research relies on systematic experiments designed to uncover new and original phenomena, with the primary purpose of obtaining reliable and valid predictions about the population under study. Appropriate experimental designs must be created to reveal the hidden characteristics of the population, such as the effects of specific factors on a particular response variable. In this regard, the statistical experimental design (DOE) literature aims to accurately estimate response variables and minimize experimental error by offering various approaches, such as full and fractional factorial designs, the Latin square method, and Taguchi designs (Hisam et al., 2024).

Optimizing production parameters in food processing technologies is a critical research area for improving product quality, reducing costs, and enhancing process efficiency. Traditional approaches such as single-factor experiments, orthogonal designs, or response surface methodology (RSM) have played an important role in these processes for decades. However, advances in computational technology have resulted in a fundamental transformation in the field of optimization. Accordingly, empirical approaches are increasingly being replaced by more systematic, mathematical-based, and algorithm-

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, ORCID: 0000-0001-7321-0496.

based optimization techniques. Thus, this development enables more accurate modeling of process variables and the development of more effective decision-making techniques. On the other hand, new optimization approaches integrated with traditional optimization methods provide the opportunity to optimize processes in a more reliable manner (Song et al., 2024).

Traditional single-factor analyses provide basic information about the behavior of factors in processes, but they have significant limitations in that they ignore variable interactions and require many experiments. Therefore, alternative approaches such as RSM have been widely adopted in the literature because they offer more detailed modeling with fewer experiments. However, the Taguchi method (TM) provides significant advantages, especially in situations where the effects of multiple factors are evaluated quickly, systematically, and at low cost. Taguchi designs enable product quality to be achieved closer to the target value with lower variance by considering control and noise factors simultaneously, thus providing a process control level that classical single-factor methods cannot achieve (Taguchi, 1986). Furthermore, the use of orthogonal array (OA) significantly reduces the number of experiments in food production systems containing numerous parameters, thereby accelerating the optimization process (Arteaga-Cabrera et al., 2025).

Thus, despite the prevalence of modern computational optimization tools, the TM remains an effective, economical, and scientifically robust tool (Charteris, 1992). The main motivations for its increasing popularity among researchers and industrial practitioners in recent years are its ease of use, affordability, effective product development capability, and ability to overcome the limitations of single factor approaches. Given the high product defect rates encountered in the food and beverage industry, Taguchi DOE is an ideal tool for new product

development, optimizing process parameters, reducing costs, and verifying product performance (Antony et al., 2024).

The purpose of this section is to highlight the advantages of the TM in the optimization process within food production systems, emphasizing process improvement, quality enhancement, and factors such as time and cost, by revealing its recent applications in food processing. Furthermore, both single-response and multi-response hybrid applications of the TM will be illustrated in various fields such as drying, extraction, food preservation, and product formulation development.

2. METHODOLOGY

Taguchi's method was adopted by the Japanese after World War II to improve the quality of their products (Hussein et al., 2020). This method, which is widely used in engineering applications, has been widely adopted in the optimization of complex processes today (Moghbeli et al., 2020). Recently, this approach has gained popularity for its economical use in various industrial sectors to develop new products and improve the quality (Chung et al., 2020). This method is employed to examine how process factors influence the desired product or process attributes. It also assists in identifying the optimal levels of these factors. Taguchi's method involves an optimization process aimed at improving process and product performance by determining the optimal combination of control factors, based on steps such as creating experimental matrices, conducting experiments systematically, and evaluating the obtained data (Figure 1). This technique, developed as an alternative to traditional full factorial designs, is easy to implement, faster, and provides reliable results, thus saving significant time and cost due to its requirement for fewer experiments (Moghbeli et al., 2020).

Dr. Genichi Taguchi first developed his method, he emphasizes the need to consider noise factors for quality improvement and revealing that quality cost should be measured as a deviation function from the standard (target). The OA can be used in the optimization of quality processes without requiring any statistical knowledge (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). Table 1 shows an example of a Taguchi L9 (4^3) OA consisting of 4 factors and 3 levels. Taguchi orthogonal arrays allow a substantial reduction in the number of experiments compared to full factorial designs (Table 2).

Table 1. Taguchi L9 (4^3) orthogonal design

Run order	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Table 2. Comparison of experiment numbers in full factorial and Taguchi OA

Factor	Level	Experiments	
		Full factorial	Taguchi
3	2	8	4
7	2	128	8
15	2	32,768	16
4	3	81	9
13	3	1,594,323	27

Source: Krishnaiah & Shahabudeen (2012).

In this approach, the signal to noise ratio (SNR) is the most important factor guiding optimization. Low variance is expected under experimental conditions with high signal values. Thus, product quality characteristics change in a similar manner with

high SNR. In Taguchi technique, the experimental set with the minimum noise ratio is selected as the optimal experimental set. SNR is evaluated in three classes: the higher the better (Equation 1); the nominal value is the best (Equation 2); the lower the better (Equation 3) (Ozturk et al., 2010).

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (2)$$

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

i indicates the run order, y_i is the response value, n is the design parameter, $\bar{y}$ is the average result, and s is the standard deviation.

In TM, the impact level of process parameters on responses is determined by analyzing SNR main effect plots. In these plots, the parameter level with the highest SNR value (red color) is defined as the optimal parameter level (Figure 2). The verticality of the lines in these plots also provides information about the impact levels on the process. For example, in Figure 2, the SNR change line for the A variable is considerably steeper than the other two parameters, indicating a significantly higher level of influence. Thus, for the graph below, the effect level of the parameters on the optimization process is ranked as $A > B > C$. However, whether these parameters have a statistical effect on the response variable and/or their percentage contribution levels to the optimization level can only be determined by analysis of variance (ANOVA).

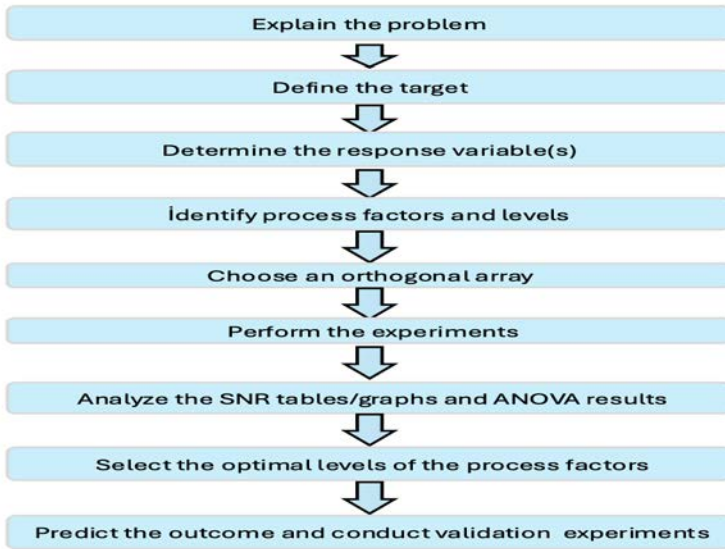


Fig. 1. The steps for performing Taguchi experiments

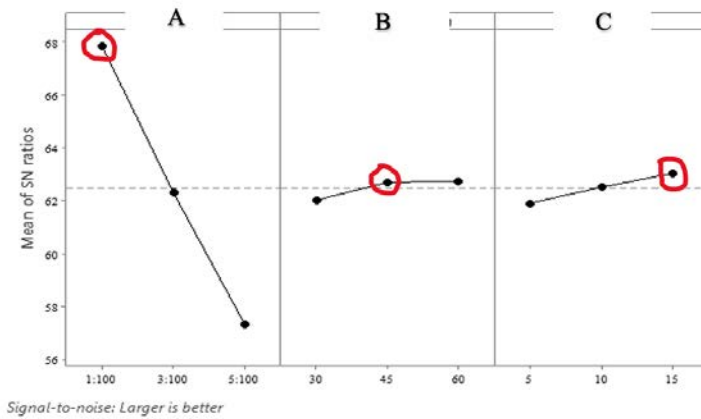


Fig 2. SNR main effect plot

The final stage of the TM involves comparing the predicted and experimentally obtained results for the response variables at the optimal parameter levels. At this stage, there should be no more than a 5% difference between the predicted

and observed results. The predicted response value can be determined using Equation 4 below.

$$\eta_0 = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (4)$$

Where η_m indicates the average response value, η_i is the average response value at the optimal level, and j is defined as the number of design variables (Güldane, 2023).

3. RECENT STUDIES ON TAGUCHI METHOD IN FOOD PROCESSES OPTIMIZATION

This section explains the process of optimizing single or multiple response characteristics using the TM or Taguchi-based alternative optimization methods. Here, the process is explained under the headings of food drying process, extraction process, improvement of product formulations, new product development, and other applications, with references to literature studies.

3.1. Food Drying Process

The TM is widely applied in drying processes to evaluate the optimal conditions for drying factors. In drying processes, the general objectives are to shorten drying time, minimize nutrient loss, and reduce drying costs.

El-Kolaly et al. (2025) used the TM and a principal component analysis-integrated composite desirability hybrid approach to improve the heat pump drying process of oyster mushrooms. The effects of the drying process variables (drying temperature (40–70 °C), air velocity (1–4 m/s), slice thickness (1–4 cm), and pretreatment (control, blanching, sonication, chemical) on the responses (drying rate, specific evaporation rate, moisture diffusion coefficient (D_{eff}), color change (ΔE), rehydration rate (Rh), total phenolic content (TFC), and total flavonoid content. According to ANOVA, the most effective

parameters on drying rate were temperature (39.2%) and air velocity (30.3%), while slice thickness (67.8%), temperature (14.5%), and pretreatment application (8.9%) were effective on D_{eff} . In multi-objective optimization, the optimal drying process was achieved at a drying temperature of 60 °C, an air velocity of 4 m/s, a slice thickness of 4 cm, and sonication pretreatment.

Sun et al. (2021) employed a Taguchi L9 design to minimize browning in puff-dried melons by examining the effects of drying temperature, puffing temperature, and drying time on color variation. According to the Taguchi analysis, the optimal settings were identified to be a color stabilization solution consisting of 0.6% NaCl + 0.15% CaCl₂ + 0.10% L-cysteine + 0.6% citric acid, 65 °C pre-drying, and 150 min of drying at 70 °C. These conditions provided lower ΔE^* , higher L^* value, and more limited 5-HMF formation compared to the control group, ensuring effective control of browning during the puffing drying process.

The TM was employed to optimize process parameters in the convective hot air drying of tomato slices. The study evaluated the effects of pretreatment (blanching, ascorbic acid, sodium metabisulfite), slice thickness (4, 6, 8 mm), and drying temperature (40, 50, 60°C) on drying time, effective moisture diffusivity, lycopene, β -carotene, and ascorbic acid. The SNRs and ANOVA findings showed that drying temperature was the most dominant variable on drying time and bioactive losses, while slice thickness had the most significant effect on moisture diffusivity. Although optimal conditions vary depending on the response, it has been determined that the combination of pretreatment with water-based blanching, thin slices, and high temperature generally provides a shorter drying time and higher nutrient retention (Hussein et al., 2021).

Moghbeli et al. (2020) utilized the TM to improve process efficiency in date powder manufacturing. For this purpose, the levels of surfactant (0.5-2.0%), pectin (3-6%), WPC (8-14%), pH (5-9.5), and temperature (160-190 °C) that maximize the yield response were determined. The study showed that the highest yield of 67% was obtained under conditions of 1% surfactant, 5% pectin, 10% WPC, pH 8.5, and 170 °C.

In a study conducted to eliminate vitamin D deficiency in foods, the TM was applied to optimize the spray drying process in the production of functional yogurt powder enriched with nano-liposomal encapsulated vitamin D. Experiments were performed using the Taguchi L16 (5⁴) experimental design, where the variables; temperature (160–190 °C), milk protein concentrate (SPC; 0–3%), modified starch (MN; 0–3%), aragum (AZ; 0–3%), and maltodextrin (MD; 10–25%) were investigated for their effect on responses (moisture content, solubility, total color difference (ΔE), and yield). ANOVA outcome revealed that the factors contributing most to the process were SPC (30%), MN (28%), MD (22%), temperature (17%), and AZ (3%), respectively. According to the analysis results, the highest yogurt powder yield (68.66%) was reported to be obtained under conditions of 180 °C, 0% SPC, 3% MN, 1% AZ, and 15% MD (Jafari et al., 2019).

3.2. Extraction Process

The Taguchi method was applied to optimize the ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from maca root (*Lepidium meyenii*) using a deep eutectic solvent system. The study evaluated the effects of DES water content, ultrasonic power, and extraction time on polysaccharide yield with a choline chloride–urea solvent. Statistical analysis indicated that ultrasonic power was the dominant factor. The highest yield was

obtained under conditions of 30% water content, 300 W ultrasonic power, and 20 min extraction time (Kim et al., 2025).

Becze et al. (2025) used the TM to optimize the extraction of proteins from sunflower meal. They performed analyses according to the Taguchi L9 OA to obtain the highest protein content while considering the following variables: pH (9.5–11.0), temperature (30–50 °C), and meal amount (40–60 g/500 mL). ANOVA results showed that the sample amount (%69.7) had the most affected the optimization process. This factor was followed by temperature and pH, respectively. The highest protein yield (47.42%) was achieved at a pH of 11.0, a temperature of 50 °C, and a sample amount of 60 g.

In a different study, Taguchi L9 design was used to optimize ultrasonic probe-assisted extraction conditions for improving the recovery of bioactive compounds from the peel and pulp of *Opuntia macrorhiza* (prickly pear). In the present study, the following factors were selected as independent variables: solvent type (0–100% ethanol), liquid-to-solid ratio (20–60 mL/g), extraction time (4–20 min), and pulsation rate (12–48 pulses/min). The response variables were TFC, betalain content, ascorbic acid, FRAP, and DPPH antioxidant activity. According to the partial least squares method integrated into the Taguchi model, the multiple response optimization conditions were determined as 60 mL/g liquid/solid ratio, 12 min duration, and 48 pulses/min for fruit pulp; and 60 mL/g liquid/solid ratio, 20 min duration, and 48 pulses/min for fruit peel (Kalompatsios et al., 2024).

The TM was employed to optimize the extraction of nanocellulose during the acid hydrolysis process in the production of nanocellulose insulation from banana peel. The present study investigated the effects of varying H₂SO₄ concentration (20–40%), time (60–360 min) and temperature

(60–80°C) at three levels on nanocellulose yield. ANOVA results indicated that the most effective variable on yield was acid concentration, followed by temperature and time. The process parameters that maximized nanocellulose yield (39.33%) were determined to be approximately 40% H₂SO₄, 127 min, and 60 degrees Celsius. Furthermore, the particle size of the obtained nanocellulose was determined to be 152.6 nm, the zeta potential was –16.9 mV, and the crystallinity index was 21.46% (Zaini et al., 2024).

Krishnegowda et al. (2023) optimized the ultrasonic-assisted extraction (UAE) process using a Taguchi L9 OA to improve phospholipid extraction from ghee residues, which is specific to South Asian cuisine obtained by removing water and milk residues from butter. The current study evaluated the effect of several parameters on the responses (i.e., phospholipid yield and antioxidant activity). The parameters evaluated included ultrasonic power (60–80%), duration (3–5 min), temperature (60–80 °C), and solvent:solid ratio (10–15 mL/g). The most significant parameters in the phospholipid extraction process were determined to be ultrasonic power and temperature. The highest phospholipid yield (24.12%) was obtained under conditions of 80% power, 4 min, 80°C, and 15 mL/g. The most effective factor in terms of antioxidant activity was determined to be the solvent:solid ratio, with optimal values established as 80% power, 3 min of extraction time, 60 °C of extraction temperature, and 15 mL of solvent per g of sample.

In a recent study, Olalere et al. (2023) employed a Taguchi-Gray Relational Analysis (GRA)-Artificial Neural Network (ANN) hybrid model to enhance the heat-reflux extraction process for bioactive compound recovery from black pepper. During the optimization process, the effects of reflux time (120–240 min), particle size (0.1–0.3 mm), and sample–solvent ratio (1:14–1:18) on TPC, DPPH, and H₂O₂ radical scavenging

activity were evaluated. Taguchi-GRA results demonstrated that the sample-solvent ratio was the parameter that most affected the process. Furthermore, the optimal conditions (TPC: 35.23 mg GAE/g sample; DPPH: 107.57 $\mu\text{g/mL}$; H_2O_2 : 87.78 $\mu\text{g/mL}$) were obtained at a 120 min reheating time, 0.2 mm particle size, and 1:16 sample-solvent ratio. The ANN model exhibited a high degree of accuracy in predicting the process, as evidenced by its R^2 value of 0.95.

The TM was employed to optimize process parameters in the microwave-assisted extraction of alkaloids from sesame leaves. Additionally, a Taguchi-ANN hybrid model was applied to predict the optimization process. The study investigated the effect of irradiation time (60–300 s), microwave power (300–500 W), oven temperature (60–90°C), mass ratio (7.7–12.5 g/mL), and solvent concentration (50–80%) on the total alkaloid yield. Taguchi results showed that the most critical variables were oven temperature (31%) and microwave power (29%). Optimal conditions were determined as 60 s irradiation, 300 W power, 60°C, 12.5 g/mL, and 80% solvent. The highest response value (15.40 mg/g) was achieved under optimal conditions during the extraction process. The ANN model was found to predict the output values with high accuracy ($R^2=0.9999$, $\text{MSE}=2.69\times10^{-7}$) (Olalere et al., 2022).

In another study (Salacheep et al., 2020), the ultrasonic-assisted extraction (UAE) process was optimized for the extraction of anthocyanins and antioxidant-rich phenolic compounds from butterfly pea (*Clitoria ternatea*) petals. The study investigated the effects of extraction time (30–60 min), temperature (40–80°C), and liquid/solid ratio (5–10 mL/g) on anthocyanin content, total phenolic content (TPC), and DPPH antioxidant activity. The liquid/solid ratio was determined to be the most significant factor affecting anthocyanin extraction (78%) and TPC (84%) in the process. Using Gray Relational Analysis

(GRA) for multi-response optimization, the optimal process parameters were determined to be an extraction time of 45 min, a temperature of 40°C, and a liquid/solid ratio of 10 mL/g.

In the extraction of phenolic compounds from onion (*Allium cepa* L.) peel using deep eutectic solvent extraction, extraction temperature (60–80 °C), time (60–120 min), choline chloride:urea:water molar ratio (1:1:4–1:3:4), and liquid-solid ratio (30:1–50:1) were evaluated. ANOVA showed that the most influential variable affecting the process was the DES molar ratio (70% contribution). The highest TPC (222.97 mg GAE/g) was obtained at 60 °C, 120 min, a liquid-solid ratio of 50:1, and a molar ratio of choline chloride:urea:water of 1:2:4. The Taguchi design determined the maximum yield with minimum experiments in phenolic extraction using environmentally friendly solvents, ensuring the effective utilization of waste onion peel as a high-value antioxidant source (Pal and Jadeja, 2019).

In another study, ultrasonic-assisted extraction with an alkaline solution was performed to develop an environmentally friendly limonin production process by eliminating the use of organic solvents, and the extraction conditions were optimized using the Taguchi L16 (4³) OA. The studies targeted the highest limonin yield (mg/g) with the variables such as pH (8–11), temperature (60–80 °C), and solution/seed ratio (7:1–20:1 v/w). The analysis revealed that the factors affecting the limonin extraction process were pH > solution/seed ratio > temperature. At the end of the process, the optimal conditions were determined to be pH 11, 70 °C, and a 20:1 solution/seed ratio, and a limonin yield of 7.55 mg/g was obtained in the validation experiments. This study demonstrated that the TM could identify the most critical parameters affecting limonin extraction without requiring a high number of experiments, enabling the reliable prediction of optimal conditions and the design of an economical, scalable process (Liu et al., 2012).

3.3. Improvement of Product Formulations and Product Development

In a study conducted to reduce animal fat intake and promote dietary diversity, the TM was used to optimize the meat flavor production process for plant-based products. The study investigated the effects of sugar type (fructose, glucose, xylose), sugar concentration (25–100 mM), and reaction temperature (140–160 °C) on Maillard reaction products, sensory meat aroma intensity, and volatile compound profile. The SNR analysis and ANOVA showed that temperature was the most important parameter directing the optimization process. The importance of applying a low temperature (140 °C) in meat-like aroma production was emphasized. Sensory analysis revealed the highest acceptability in the sample produced under conditions of 25 mM xylose and 150 °C. Additionally, volatile compound analysis showed that aldehydes, ketones, thiophenes, and alcohols characteristic of meat aroma were particularly concentrated in xylose-based samples (Sarkisyan et al., 2025).

In another study conducted by Rajapakshe et al. (2025), Taguchi's L8 OA was applied to develop a new cream formulation from button mushrooms (*Agaricus bisporus*). In this study, the factors white pepper (A), curry leaf (B), garlic (C), fresh cow's milk (D), corn flour (E), and oil type (F) were applied at two levels. The effect of process variables on sensory parameters (appearance, aroma, color, taste, and overall acceptability) was investigated. The study demonstrated that the TM is effective in quickly and systematically determining the best combination in multi-ingredient food formulations.

Taguchi's L8 OA was used to determine the most suitable combination of ingredients for developing a rice-based cracker formulation with functional properties. The flour composition (rice–wheat flour (50:50), rice–wheat–corn–mung bean

(50:40:5:5)), moringa leaf powder (0–1%), spirulina powder (0–1%), and *Syzygium cumini* bark decoction (0–15%) were investigated for their effect on consumer preferences. As a result, crackers containing rice–wheat–corn–mung bean (50:40:5:5) without moringa and spirulina and 15% *Syzygium cumini* bark decoction water were found to have the highest sensory acceptance. Furthermore, it was determined that the cracker sample prepared under optimal conditions was significantly superior to the control sample in terms of protein, mineral content, TPC, and antioxidant activity (Rathnayake et al., 2024).

Nor Shafizah et al. (2022) applied the TM to optimize free fatty acid (FFA) removal from crude palm oil via adsorption. Adsorption time (30–90 min), stirring speed (300–700 rpm), adsorbent level (1–5% w/w), and K₂O loading (5–15% w/w) were evaluated using a Taguchi L9 design. The results were analyzed with the higher-the-better SNR criteria. Optimal FFA removal occurred at 30 min, 700 rpm, 5% adsorbent, and 15% K₂O. ANOVA indicated that K₂O loading (67%) and adsorbent dosage (27%) were the main contributors to the adsorption efficiency.

The combination of the TM and GRA was employed to optimize the multi objective quality characteristics of a sourdough bread formulation developed using djulis (*Chenopodium formosanum*). In this study, the independent variables were investigated for their effects on texture profile analysis, color, and sensory evaluation. The Taguchi-based GRA results determined that the formulation containing 20% djulis yeast, 0% hulled djulis, 8% butter, 80% wheat flour, 20% high-gluten flour, and 10% honey optimized all responses. The study showed that the Taguchi–GRA approach is a highly effective method for determining the most suitable formulation by simultaneously optimizing multiple quality criteria in bread development processes (Chung et al., 2020).

3.4. Other Studies

This section provides some examples of TM applications in freezing, storage, and frying processes. Sardari et al. (2025) employed the TM to optimize the parameters in probe-type ultrasonic immersion freezing (UIF). Two control factors were evaluated in the study: ultrasonic power (50–400 W, 8 levels) and duty cycle (50% and 100%, 2 levels). Quality responses such as freezing time, thawing loss, cooking loss, and cutting force were optimized using an L16 orthogonal array. According to the Taguchi analysis, the most suitable combination for all quality parameters was determined to be 125 W ultrasonic power + 50% duty cycle (HDC–UIF–125). This condition produced the shortest freezing time, significantly reduced thawing and cooking losses, and provided the closest texture properties to fresh. SEM images also showed that the smallest and most uniform ice crystals formed under this condition.

In another study (Qiu & Wu, 2021), Taguchi experimental design was used to improve the cold storage quality of *Larimichthys crocea* fish fillets processed using the sous vide method. The salt (0–2%), processing temperature (60–90 °C), processing time (10–40 min), and rosemary extract (0–0.3%) were investigated for their influences on the microbial growth, lipid oxidation, total volatile basic nitrogen (TVB-N), weight loss, and sensory quality of the fish fillets. According to Taguchi analysis, the factors with the highest effect on quality were the temperature and time interaction (microbial load) and the temperature and rosemary extract interaction (lipid oxidation).

The optimal packaging conditions for determining the quality stability of reduced-calorie gluten-free biscuits during storage were evaluated using the Taguchi L27 orthogonal design. The study examined three different packaging materials (metallized BOPP, co-extruded PP, and HDPE) and two storage

temperatures (30°C and 40°C) as factors; moisture content, FFA amount, microbial load, and sensory qualities were evaluated as response variables. ANOVA results showed that the most dominant variable affecting storage performance was overall acceptability (contribution 73.97%), followed by texture–mouthfeel (11.56%) and moisture content (10.20%). The highest sensory stability was determined to be achieved at 30°C in metallized BOPP packaging (Singh & Kumar, 2019).

Chandrasekar et al. (2015) used a Taguchi L4 (2³) orthogonal factors affecting the shelf life of peanut design consisting of three factors at two levels to optimize the process chutney. The effects of the variables, such as vinegar (5–10%), packaging material (glass bottle–plastic container), and storage temperature (room temperature, -5 ± 2 °C), on the responses of FFA, peroxide value (PV), TPC, and overall acceptability were investigated. The study determined that optimal quality conditions were achieved with 10% vinegar (A2), glass packaging (B1), and cold storage (C2).

In a study conducted in the years before the use of the TM became as widespread in food sector as it is today (Oztop et al., 2007), the Taguchi L27 OA was used in order to optimize the key parameters affecting quality in the microwave-assisted frying of potato slices. The study examined how microwave power (400, 550, 700 W), frying duration (2.0–3.0 min), and oil type (sunflower, corn, peanut) influenced moisture content, oil uptake, color, and texture of potato samples. ANOVA indicated that microwave power and frying time were the primary factors affecting all quality attributes, while oil type had a notable effect on oil absorption. Using Qualitek-4, multiple quality responses were integrated, identifying 550 W, 2.5 min, and sunflower oil as the optimal conditions.

4. CONCLUSION

The evaluations conducted in this section demonstrate that the Taguchi method is an effective and practical tool for optimizing food processes. The Taguchi technique allows the effects of multiple factors to be examined with a small number of experiments by means of orthogonal arrays. The effect of process parameters on the response can be measured using Signal to Noise ratios. Furthermore, the level of significance of the factors on the process can be revealed through ANOVA analyses. The literature data reviewed in this section showed that the Taguchi approach was successfully applied in food processes involving both single and multiple responses. As a result, the Taguchi method was found to provide numerous advantages in food processing by improving product quality, reducing production costs, and saving time.

REFERENCES

- Antony, J., Bhat, S., Mittal, A., Jayaraman, R., Gijo, E. V., & Cudney, E. A. (2024). Application of Taguchi design of experiments in the food industry: a systematic literature review. *Total Quality Management & Business Excellence*, 35(5-6), 687-712. <https://doi.org/10.1080/14783363.2024.2331758>
- Arteaga-Cabrera, E., Ramírez-Márquez, C., Sánchez-Ramírez, E., Segovia-Hernández, J. G., Osorio-Mora, O., & Gómez-Salazar, J. A. (2025). Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions. *Applied Sciences*, 15(7), 3846. <https://doi.org/10.3390/app15073846>.
- Becze, A., Senila, M., Senila, L., Dordai, L., Cadar, O., Fuss-Babalau, V. L., Roman, M., Levei, L., Uiuiu, P., & Naghiu, M. O. (2025). Optimization of Protein Extraction from Sunflower Meal Using Taguchi Design and Regression Modeling for Human Nutrition Applications. *Foods*, 14(14), 2415. <https://doi.org/10.3390/foods14142415>
- Chandrasekar, V., Kannan, K., Priyavarshini, R., & Gayathri, R. (2015). Application of taguchi method in optimization of process factors of ready to eat peanut (*Arachis hypogaea*) Chutney. *International Food Research Journal*, 22(2), 510.
- Charteris, W. (1992). Taguchi's system of experimental design and data analysis: a quality engineering technology for the food industry. *International Journal of Dairy Technology*, 45(2), 33-49. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.1992.tb01723.x>

- Chung, P.-L., Liaw, E.-T., Gavahian, M., & Chen, H.-H. (2020). Development and Optimization of Djulis Sourdough Bread Using Taguchi Grey Relational Analysis. *Foods*, 9(9), 1149. <https://doi.org/10.3390/foods9091149>.
- El-Kolaly, W., Abdelkader, T. K., Wang, Y., Abd-Elhalim, H., Li, M., Rong, J., & Abdelhamid, M. A. (2025). Mushroom drying optimization using the Taguchi and Composite desirability methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.14383>
- Güldane, M. (2023). Optimizing foam quality characteristics of model food using Taguchi-based fuzzy logic method. *Journal of Food Process Engineering*, 46(8), e14384. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14384>
- Hisam, M. W., Dar, A. A., Elrasheed, M. O., Khan, M. S., Gera, R., & Azad, I. (2024). The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 23(4), 365-389, <https://doi.org/10.1007/s44199-024-00093-9>.
- Hussein, J. B., Oke, M. O., Abiona, O. O., & Adebayo, Q. (2021). Optimization of processing parameters for drying of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L. var) slices using Taguchi technique. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2), e15149. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15149>
- Jafari, S. M., Vakili, S., & Dehnad, D. (2019). Production of a functional yogurt powder fortified with nanoliposomal vitamin D through spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 12(7), 1220-1231. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02289-9>

- Kalompatsios, D., Athanasiadis, V., Mantiniotou, M., & Lalas, S. I. (2024). Optimization of Ultrasonication Probe-Assisted Extraction Parameters for Bioactive Compounds from *Opuntia macrorhiza* Using Taguchi Design and Assessment of Antioxidant Properties. *Applied Sciences*, 14(22), 10460. <https://doi.org/10.3390/app142210460>
- Kim, E. J., Kim, C. Y., & Yoon, K. Y. (2025). Application of Taguchi Method to Optimize Deep Eutectic Solvent-Based Ultrasound-Assisted Extraction of Polysaccharides from Maca and Its Biological Activity. *Food and Bioprocess Technology*, 18(3), 2709-2720. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03625-4>
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied design of experiments and Taguchi methods*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Krishnegowda, R., Sharma, M., Ravindra, R. M., & Naik, L. N. (2023). Process optimization and kinetics for ultrasonication assisted extraction of phospholipids from ghee residue. *Journal of Food Process Engineering*, 46(6), e14260. Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14260>
- Liu, C., Liu, J., Rong, Y., Liang, N., & Rong, L. (2012). Aqueous extraction of Limonin from Citrus reticulata Blanco. *Czech Journal of Food Sciences*, 30(4).
- Moghbeli, S., Jafari, S. M., Maghsoudlou, Y., & Dehnad, D. (2020). A Taguchi approach optimization of date powder production by spray drying with the aid of whey protein-pectin complexes. *Powder Technology*, 359, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.013>

- Olalere, O. A., Gan, C. Y., Taiwo, A. E., Alenezi, H., Maqsood, S., & Adeyi, O. (2022). Investigating the microwave parameters correlating effects on total recovery of bioactive alkaloids from sesame leaves using orthogonal matrix and artificial neural network integration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), e16591. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16591>
- Olalere, O. A., Gan, C. Y., Taiwo, A. E., Nour, A. H., Dominguez, B. C., Adeyi, O., ... & Adiamo, O. Q. (2023). Heat-reflux processing of black peppercorn into bioactive antioxidant oleoresins: a three-functioned Taguchi-based grey relational grading. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 4140-4148. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01951-3>
- Oztop, M. H., Sahin, S., & Sumnu, G. (2007). Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.031>
- Ozturk, I., Golec, A., Karaman, S., Sagdic, O., & Kayacier, A. (2010). Evaluation of *Listeria monocytogenes* survival in ice cream mixes flavored with herbal tea using Taguchi method. *Foodborne Pathogens and disease*, 7(10), 1263-1267. <https://doi.org/10.1089/fpd.2010.0586>
- Pal, C. B. T., & Jadeja, G. C. (2019). Microwave-assisted deep eutectic solvent extraction of phenolic antioxidants from onion (*Allium cepa* L.) peel: A Box–Behnken design approach for optimization. *Journal of Food Science and Technology*, 56(9), 4211-4223. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03891-7>
- Qiu, X., & Wu, Y. (2021). Application of Taguchi method to improve the sous vide processed large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fillet product quality during cold

- storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), e15565. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15565>
- Rajapakshe, B. P. S., Maneesha, K. A. V., Jayapema, K. K. C., & Navaratne, S. (2025). Development of value-added savory cream from button mushroom (*Agaricus bisporus*) and evaluation of chemical, physical and microbiological characteristics. *Journal of Future Foods*, 5(4), 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.07.019>
- Rathnayake, H. A., Navaratne, S. B., & Navaratne, C. M. (2024). Formulation of a Biologically-leavened Composite Cracker with Functional Properties. *Journal of Culinary Science & Technology*, 22(5), 1025-1043. <https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2102560>
- Sardari, H., Alimardani, R., Firouz, M. S., & Hosseinpour, S. (2025). Probe-Type Ultrasound-Assisted Immersion Freezing of Meat, Study of Selected Quality Factors and Taguchi-Based Process Optimization. *Applied Food Research*, 101115. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101115>
- Sarkisyan, V., Bilyalova, A., Vorobyeva, V., Vorobyeva, I., Malinkin, A., Zotov, V., & Kochetkova, A. (2025). Optimization of the Meat Flavoring Production Process for Plant-Based Products Using the Taguchi Method. *Foods*, 14(1), 116. <https://doi.org/10.3390/foods14010116>.
- Shafizah, I. N., Irmawati, R., Omar, H., Yahaya, M., & Aina, A. A. (2022). Removal of free fatty acid (FFA) in crude palm oil (CPO) using potassium oxide/dolomite as an adsorbent: Optimization by Taguchi method. *Food Chemistry*, 373, 131668. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131668>

- Singh, A., & Kumar, P. (2019). Storage stability determination of calorie deficit gluten-free biscuit: Taguchi concern. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(5), e13927. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13927>
- Song, J., Zhang, Z., Mu, Y., Wang, X., Chen, H., Pan, Q., & Li, Y. (2024). Enhancing environmental sustainability via interval optimization for low-carbon economic dispatch in renewable energy power systems: Leveraging the flexible cooperation of wind energy and carbon capture power plants. *Journal of Cleaner Production*, 442, 140937. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140937>
- Sun, X., Shokri, S., Wang, Z., Li, B., & Meng, X. (2021). Optimization of explosion puffing drying for browning control in Muskmelon (*Cucumis melo* L.) using Taguchi orthogonal arrays. *Lwt*, 142, 111021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111021>.
- Zaini, H. M., Saallah, S., Roslan, J., Sulaiman, N. S., & Pindi, W. (2024). Isolation and Characterization of Nanocellulose from Banana Peels via a One-Pot Hydrolysis System Using the Taguchi Method. *Food Biophysics*, 19(4), 1017-1028. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09875-1>

GIDA İŞLETMELERİNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ

Benan DİNÇ GİRGİN¹

1. GİRİŞ

Gıda sanayi, geniş ürün çeşitliliği nedeniyle çok sayıda alt sektörü bünyesinde barındırmakta olup, bu sektörler kendi içlerinde farklı yapısal ve teknolojik özellikler göstermektedir. Ürün çeşitliliğinin fazla olmasına karşın, üretim süreçlerinde genellikle benzer nitelikte fiziksel ve kimyasal işlemlerden oluşan ortak imalat adımları izlenmektedir (İSGGM, 2024).

Gıda üretimi gerçekleştiren işletmelerde iş güvenliği açısından dikkat edilmesi gereken çok sayıda kritik unsur bulunmaktadır. Elektrik sistemleri, üretim hatları ve makineler, kullanılan ekipman ve kimyasallar, yoğun personel hareketliliği, depolama süreçleri ve sevkiyat faaliyetleri gibi alanlar, iş sağlığı ve güvenliği müdahalelerinin zorunlu olduğu başlıca noktalar arasında yer almaktadır. Ayrıca, üretim süreçlerinde çalışanların sağlığının korunması kadar, ortaya çıkan ürünün kalitesinin sürekliliğinin sağlanması da büyük önem taşımaktadır (Parlak, 2017).

Gıda ürünleri ve içecek imalatı sektöründe çalışan sayısının fazla olması ve bu sektörde iş kazaları ile sağlık sorunlarının görece yüksek oranlarda görülmesi, işyerlerinde mevcut tehlike ve risklerin sistematik biçimde belirlenmesini ve

¹ Öğr. Gör. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Pazarlar Meslek Yüksekokulu, 0000-0001-6682-6567.

buna uygun İSG önlemlerinin etkin bir şekilde uygulanmasını zorunlu kılmaktadır (İSGGM, 2024).

Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerine göre, son üç yıla ait gıda sektörü işyeri sayıları ve gıda sektörü çalışan sayıları istatistikleri Tablo 1.' de yer almaktadır.

Tablo 1. Gıda sektörü işyeri ve çalışan sayıları istatistikleri.

	2022	2023	2024
Gıda sektörü işyeri sayısı	49.456	48.576	50.040
Gıda sektörü çalışan sayısı	558.997	527.106	555.053

2. GIDA İŞLETMELERİNDE ÇALIŞANLARIN KARŞILAŞABİLECEĞİ RİSK ETMENLERİ

Gıda üretim sektöründe tazeliğin korunması ve çeşitli işleme adımları, çalışanların farklı sıcaklık düzeylerine sahip ortamlarda görev yapmasını gerektirir (Thetkathuek, Yingratanasuk, Jaidee, & Ekburanawat, 2015; Seng, Ye, Choy, & Ho, 2018). Bu sektörde aynı zamanda tarım ve su ürünlerinin işlenmesi ile ağır yüklerin taşınması gibi tekrarlayıcı işlerin yaygın olması da dikkat çekicidir (Musolin, Ramsey, Wassell, & Hard, 2014; Seng et al., 2018).

Sakız-şekerleme üretim tesisine yönelik yapılan bir çalışmada üretim sürecinde şekerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan pudra şekerinin, çalışma ortamında yoğun toz birikimine yol açtığı, bu durumun çalışan sağlığı açısından önemli bir risk oluşturduğu, bunun yanı sıra, hammadde ekleme aşamalarında karıştırma kazanları ve tanklara malzeme aktarımı sırasında taşıma-kaldırma faaliyetleri ile zaman zaman yüksekte çalışma gereksinimi de ek risk faktörü olarak belirtilmiştir. Ürünlerin kaplama aşamasında ise kaplama kazanlarının bulunduğu alanda ortaya çıkan yüksek gürültü seviyesinin çalışanların sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek nitelikte tespit edildiği bildirilmiştir (Parlak, 2017).

Çay toplama işlerinin iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirildiği bir çalışmada, çay bahçelerinde yabancı otlarla mücadele, zararlı hayvanlarla karşılaşma, engebeli arazide çalışma, tekrarlayan hareketler ve ağır iş yükü gibi fiziksel ve ergonomik tehlikelerin önemli riskler oluşturduğu, ayrıca düzensiz çalışma saatleri, sosyal hak yetersizliği ve yüksek iş temposunun çalışanlar üzerinde psikososyal baskılar yarattığı ve COVID-19 pandemisinin ise iş gücü sorunlarını belirginleştirdiği bildirilmiştir. Sonuç olarak ta modernizasyon, mekanizasyon ve üretici eğitimlerinin güçlendirilmesinin hem verimliliği hem de iş sağlığı ve güvenliği koşullarını iyileştirecek önemli unsurlar olarak öne çıktığı belirtilmiştir (Parlak, 2021).

2.1. Fiziksel Risk Etmenleri

Gürültü ve titreşim, kontrol önlemleri alınmadığı takdirde çalışanların sağlığını olumsuz etkileyebilecek iki önemli fiziksel tehlikedir (Amiri, Bayatian, & Mozafari, 2024). Gürültü, dünya genelindeki birçok iş yerinde yaygın olarak görülen bir mesleki tehlikedir (Girard et al., 2015). Aşırı gürültüye maruz kalmak yorgunluğa, dikkat dağınıklığına ve iletişim zorluğuna yol açabilir; bunların hepsi de işyerinde yaralanmalara neden olabilir (Girard et al., 2015). Sağlık açısından bakıldığında, aşırı gürültü kardiyovasküler etkilerle (Lie et al., 2016) ve gürültü kaynaklı işitme kaybıyla (Tak, Davis, & Calvert, 2009) ilişkilidir.

Titreşim, damarsal bozukluklar, periferik nörolojik bozukluklar ve kas-iskelet sistemi bozuklukları gibi sendromlara yol açar (Benson, Dimopoulos, Argyropoulos, Varianou Mikellidou, & Boustras, 2021). Gıda ve içecek ürünleri imalatında, özellikle öğütme ve eleme işlemlerinin gerçekleştirildiği üretim alanlarında ve forklift operatörlerinde, süreç ve ekipman kaynaklı titreşim maruziyeti önemli bir fiziksel risk unsuru olarak ortaya çıkmaktadır (İSGGM, 2024).

Gürültüye yönelik maruziyetin önlenmesi amacıyla Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 28.07.2013 tarihli, 28721 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren "Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik", işyerlerinde gürültü tehlikesine karşı alınması gereken önlemleri; titreşime yönelik maruziyetin önlenmesi amacıyla ise Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 22.08.2013 tarihli, 28743 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren "Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik" ise işyerlerinde titreşim tehlikesine karşı alınması gereken önlemleri düzenlemektedir.

Gıda üretim endüstrisi, ürünlerin tazeliğinin korunması ve çeşitli işlemlerden geçirilmesini gerektirdiği için farklı sıcaklık koşullarının bulunduğu çalışma ortamlarını barındırmaktadır (Thetkathuek et al., 2015; Seng et al., 2018). Bazı gıda hazırlama çalışanları soğuk odalarda sekiz saat veya daha fazla zaman geçirebilir. Soğuk oda çalışanlarının algıladığı termal konfor endişelerinin, iş istasyonlarındaki hava akımlarından, el becerisi endişeleri nedeniyle yetersiz kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımından, çalışma uygulamalarından ve soğuk odalardaki iyi sağlık ve güvenlik uygulamaları hakkında bilgi eksikliğinden kaynaklanmış olabileceği belirtilmiştir (Ceballos, Mead, & Ramsey, 2015). Bir çalışmada, kapalı alanda pirinç eriştisi üretim fabrikalarında çalışanların ısı stresine maruz kalabileceği ve mevcut önlemlerin, çalışanları ısı stresi yaralanmalarına karşı korumak için yeterli olmayabileceği, mühendislik kontrolleri ve ısıya uyum programları gibi önleyici tedbirler önemli olduğu bildirilmiştir (Seng et al., 2018).

İşyerlerinde fiziksel risk etmenlerinden bir diğeri olan aydınlatma gıda ve içecek ürünleri imalatı sektöründe özellikle öğütme bölümleri ile taneli hammaddelerin ve ürünlerin depolandığı alanlarda yetersiz olmasından kaynaklı çeşitli

güvenlik ve üretim sorunlarına yol açabilmektedir. Aydınlatma düzeyinin düşüklüğüne bağlı olarak kırma işlemlerinde hatalar, görüş azalmasına bağlı takılma, kayma ve düşme gibi kazalar ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca kullanılan aydınlatma sistemlerinin ve armatürlerin koruma sınıfının proses koşullarına uygun olmaması, toz birikimi ile birleştiğinde ekipmanlarda ısınma ve sonuç olarak yangın riskini artırmaktadır. Meydana gelen yangınlar ise cilt ve derin dokularda yanıklar, buna bağlı nekroz, enfeksiyon, stres ülserleri, çeşitli doku hasarları ve hatta ölümle sonuçlanabilen ciddi sağlık etkilerine neden olabilmektedir (İSGGM, 2024).

Bir diğer fiziksel risk etmeni ise radyasyon olup, endüstriyel ışınlamanın en çok kullanıldığı alanlar tıbbi ve farmasötik ürünlerin sterilizasyonu, gıda maddelerinin muhafazası, polimer sentezi ve modifikasyonu, böcek istilasının ortadan kaldırılmasıdır (Sanaye, Baburajan, Pawar, Nalawade, & Sapra, 2012). Akut radyasyona maruz kalma cilt yanıklarına ve akut radyasyon sendromuna neden olabilir ve kronik maruz kalmaların işçilerde kanser ve kardiyovasküler hastalıklara neden olduğu bildirilmiştir (Strom, 2003).

Gıda ve içecek ürünleri imalatı sektöründe yürütülen işlemlerin niteliği, çoğu zaman geniş ve yüksek hacimli üretim alanlarının kullanılmasını gerektirmektedir. Bu tür büyük çalışma ortamlarında, hem genel alan aydınlatmasının hem de işlem veya kontrol noktalarına yönelik özel aydınlatmanın sağlanmasında çeşitli güçlüklerle karşılaşılabilir (İSGGM, 2024).

Düşük ışık ortamı insan fizyolojisini, psikolojisini ve davranışını etkiler ve iş hatalarına neden olur ve kazaları artırır (Li et al., 2022). İşyerlerinde uygun bir aydınlatma düzeninin sağlanması, hem yürütülen işlemlerin istenen kalite düzeyinde gerçekleştirilebilmesi hem de çalışanların görsel sağlığının korunması açısından temel bir gerekliliktir. Optimal aydınlatma

koşulları, çalışanların görme performansını artırarak hata yapma olasılığını düşürmekte ve buna bağlı olarak iş kazası riskinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Şimşek, 2023).

2.2. Kimyasal Risk Etmenleri

Gıda endüstrisinde karşılaşılan bir diğer önemli tehlike ise kimyasal etmenlerdir. Kimyasalların gıdaya doğrudan ya da dolaylı yollarla bulaşabilme olasılığı, ürün güvenliğini tehdit etmekte ve insan sağlığı açısından ciddi riskler yaratabilmektedir (Çetin & Şahin, 2017).

İmalat sanayi, dünya genelinde tüketicilere temel mal ve hizmet sağlayarak küresel ekonominin önemli bir bileşeni olarak işlev görmektedir. Ancak bu sektörün üretim süreçleri çoğu zaman tehlikeli kimyasalların kullanılmasını gerektirmekte ve bu maddelere sürekli maruz kalan çalışanlar açısından ciddi sağlık riskleri oluşturmaktadır. Üretim ortamlarında karşılaşılan tehlikeli kimyasallara çözücüler, asitler, alkaliler, ağır metaller ve pestisitler gibi çeşitli maddeler örnek gösterilebilir (Demirer & Kayhan, 2016).

Mutfaklarda ısıtma amacıyla kullanılan sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ile depolanan ve kullanılan çeşitli kimyasal maddeler, yangın, parlama ya da patlama gibi ciddi tehlikelere yol açabilecek risk unsurları arasında yer almaktadır (Olca, 2019).

Kimyasal risk etmenlerine yönelik maruziyetin önlenmesi amacıyla Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 12.08.2013 tarihli, 28733 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren "Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik", işyerlerinde kimyasal tehlikelere karşı alınması gereken önlemleri düzenlemektedir.

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Rehberlik ve Teftiş Başkanlığı tarafından yürütülen “2022 Yılı Gıda Sektöründe İş

Sağlığı ve Güvenliği Programlı Teftişi” kapsamında, sektörde sıkça rastlanan eksiklikler ve mevzuata aykırılıklar belirlenmiş olup, "Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik” kapsamında mevzuata aykırı bulgular aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Tehlikeli kimyasal maddelerin ayrı bir alanda güvenli şekilde depolanmaması,
- Tehlikeli kimyasal madde bulunan bölümlerin uygun şekilde etiketlenmemesi,
- Kimyasal maddelerin Güvenlik Bilgi Formlarının bulunmaması,
- İşyeri ortamında gereğinden fazla kimyasal madde bulundurulması,
- İşyerinde kimyasal madde ölçümünün yapılmaması,
- Gerekli bölümlerde göz ve/veya vücut duşu bulunmaması (ÇSGB, 2023).

Çalışma ortamlarında farklı türlerde tehlikeli kimyasal maddelerin bulunması olasıdır ve bu maddeler, çalışanlar açısından hem kısa süreli hem de uzun dönemde ortaya çıkabilecek sağlık etkileri bakımından önemli riskler oluşturabilir. Bu nedenle, işyerinde kullanılan kimyasalların özelliklerinin, taşıdıkları tehlikelerin ve insan sağlığı üzerindeki olası etkilerinin doğru şekilde değerlendirilmesi; çalışanların korunmasına yönelik uygun kontrol tedbirlerinin uygulanması açısından kritik bir gerekliliktir (Duman & Bozkurt, 2021).

Kimyasal maddelerin depolanması, kullanımı ve bertarafı sırasında güvenlik bilgi formlarında ve ürün etiketlerinde belirtilen talimatlara uyulmalı ve bu maddelerin mümkün olan en düşük miktarlarda bulundurulması, hem solunumla ilgili sağlık sorunlarının hem de yangın ve patlama gibi güvenlik tehlikelerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır (Olcay, 2019).

2.3. Biyolojik Risk Etmenleri

Biyolojik risk etmenleri, yalnızca doğal çevrede bulunan canlı organizmalardan veya toz-toprak birikimlerinden değil, aynı zamanda üretim ve tüketim süreçlerinde kullanılan çeşitli malzemelerden de kaynaklanabilmekte ve bu durum insan sağlığı açısından önemli tehditler oluşturabilmektedir (Erkmen, 2010).

Biyolojik risk etmenlerine yönelik maruziyetin önlenmesi amacıyla Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından hazırlanan ve 15.06.2013 tarihli, 28678 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Biyolojik Etkenlere Maruziyet Risklerinin Önlenmesi Hakkında Yönetmelik”, işyerlerinde biyolojik tehlikelere karşı alınması gereken önlemleri düzenlemektedir.

Biyolojik etkenlerle çalışılan ortamlarda hijyen önlemleri, bu etkenlerin çalışma alanı dışına taşınmasını veya ortama sızmasını engellemede önemli bir rol oynamaktadır (Yağımlı, 2017).

Dalyan, Canpolat, Öztürk, & Pişkin (2023), gıda sektörü personellerinin bireysel hijyen davranışlarının salgın hastalık farkındalık düzeylerine etkisini inceledikleri bir çalışmada, evli, 56 yaş ve üzeri, ön lisans mezunu, hijyen eğitimi almış ve çocuk sahibi çalışanların hijyen uygulamalarına daha fazla dikkat ettiklerini, bu bulgular doğrultusunda, işletmelerin hijyen eğitim programlarını özellikle bekar, genç, 56 yaş altı ve eğitim düzeyi ön lisansın altında olan çalışanlara yönelik olarak güçlendirmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, tüm yemekhane ve gıda hizmeti personeline düzenli aralıklarla hijyen eğitimi verilmesinin, COVID-19 benzeri salgın hastalıkların yayılımını kontrol altına almada kritik bir rol oynadığını vurgulamışlar ve hijyen eğitimlerinin periyodik olarak tekrarlanmasının çalışanlarda kalıcı hijyen davranışlarının oluşmasına katkı sağlayacağını belirtmişlerdir.

Gıda işletmelerinden biri de süt ve süt ürünleri endüstrisidir. Süt, hayvansal kökenli bir gıda ürünü olması nedeniyle çeşitli biyolojik riskleri beraberinde taşımaktadır. Süt üretim tesislerinde çalışanlar, çiğ sütte bulunabilen bakteriler ve diğer mikrobiyolojik etkenlere maruz kalabilmektedir. Hayvandan süte, süttten insana bulaşabilen tüberküloz, salmonelloz ve bruselloz gibi hastalıklar bu riskler arasında yer almaktadır. Özellikle işlenmemiş ve ham sütün toplandığı tanklarda mikroorganizmaların çoğalmasını kontrol etmek güçtür. Bu tür mikrobiyolojik tehlikeler hem sağımı yapılan hayvandan hem de çevresel koşullardan kaynaklanabilmektedir (Bilgin, 2021).

2.4. Psikososyal Risk Etmenleri

Bir çalışmada gıda üretim endüstrisindeki çalışma koşullarının kas-iskelet sistemi ağrıları üzerinde etkisi olduğu bulunmuştur. Çalışma ayrıca, iş-aile çatışmasının kas-iskelet sistemi ağrısını etkilediğini ortaya koymuştur. Bu nedenle gıda üretim sektöründe çalışan işçilerde kas-iskelet sistemi ağrılarını azaltmak için iş-aile çatışmasının önlenmesi gerektiği belirtilmiştir (Kim & Jeong, 2024).

Çalışma ortamında psikososyal risk etmenlerinin iş kazası, meslek hastalıkları ve işle ilgili hastalıklarla ilişkisini inceleyen bir çalışmada, psikososyal risklerin geniş kapsamlı etkileri göz önünde bulundurulduğunda, bu konuda tüm paydaşlara önemli sorumluluklar düştüğü, bu nedenle işçi ve işveren sendikalarının, meslek örgütlerinin ve insan kaynakları birimlerinin süreci sahiplenerek gerekli destekleri sağlamaları gerektiği bildirilmiştir (Aydın, Canbey Özgüler, İlhan, DemiRkaya, & Kocabaş, 2018).

Bir çalışma, ABD et endüstrisi işçilerinin yüksek düzeyde kaygı, düşmanlık ve depresyon yaşadığını ortaya koyarak, iş

yerinde ruh sağlığı hizmetlerinin iyileştirilmesi ihtiyacını vurgulamıştır (Liberatore, 2007).

Bir çalışmada, konaklama ve yiyecek-içecek işletmelerinde çalışanları psikososyal açıdan en çok etkileyen unsurlardan birinin iş stresi olduğu belirtilmiş ve çalışma ortamında strese yönelik organizasyonel ve bireysel tekniklerin uygulanması önerilip; stresin yol açtığı olumsuzluklardan korunmak için ise öncelikle stres kaynaklarının azaltılması, ardından stresle karşı karşıya kalan bireylerin stresle başa çıkma yöntemlerini bilmeleri ve uygulamaları gerektiği vurgulanmıştır (Çalık & Demir, 2015).

Literatür incelendiğinde, psikososyal risk etmenleri dışındaki risk etmenlerine daha çok dikkat çekildiği görülmektedir. Bunun sebebini ise Leka & Cox, (2008), psikososyal risklerin herkes için aynı şekilde ortaya çıkmamasına ve ölçülebilirliğinin sınırlı olmasına dayandırmaktadır.

3. GIDA İŞLETMELERİNDE İŞ KAZALARI VE MESLEK HASTALIKLARI

Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerine göre, son üç yıla ait gıda sektörü iş kazası geçiren sigortalı sayısı, iş kazası sonucu ölen çalışan sayısı ve meslek hastalığı geçiren sigortalı sayısı istatistikleri Tablo 2.' de yer almaktadır.

Tablo 2. İş kazası geçiren sigortalı sayısı, iş kazası sonucu ölen çalışan sayısı, meslek hastalığı geçiren sigortalı sayısı ve meslek hastalığı sonucu ölen çalışan sayısı istatistikleri.

	2022	2023	2024
İş kazası geçiren sigortalı sayısı	32.305	36.948	40.622
İş kazası sonucu ölen çalışan sayısı	29	73	65
Meslek hastalığı geçiren sigortalı sayısı	27	35	26
Meslek hastalığı sonucu ölen çalışan sayısı	0	0	0

3.1. İş Kazaları

"Gıda İçecek İşletmelerinde Mesleki Travma Yaralanmalarının Nedenleri, Koşulları ve Sonuçlarının Analizi" adlı çalışmada, endüstriyel yaralanmaların %80'inin organizasyonel faktörlerden kaynaklandığı tespit edilmiş; en sık karşılaşılan organizasyonel nedenlerin ise iş disiplini ve endüstri disiplini ihlalleri ile güvenli iş uygulamaları eğitimindeki yetersizlikler olduğu belirlenmiştir (Evtushenk, Siryk, & Zomchak, 2019).

Bir çalışmada buharlı pişirme kazanları iş sağlığı ve güvenliği yönünden incelenmiş ve gıda işletmelerinde sıkça kullanılan bu ekipmanın gerekli tedbirler alınmadığında ve bakımları yapılmadığında, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık etkisi ile yüksek riske sahip olduğu, kazanların kullanımında genel olarak kullanım ve kontrol bilincinin düşük olduğu belirtilmiş ve Basınçlı ekipmanların periyodik kontrollerinin, ilgili yönetmelik doğrultusunda en az yılda bir kez yapılması, tespit edilen uygunsuzlukların giderilene kadar ekipmanın kullanım dışı bırakılması, kazan operatörlerine yönelik risklerin ortadan kaldırılması; tesislerde risk düzeyine uygun olarak iş sağlığı ve güvenliği uzmanı bulundurulması ve işverenin periyodik kontrolleri zamanında yaptırma yükümlülüğünü yerine getirmesi gerektiği bildirilmiştir.

Sosyal Güvenlik Kurumu yıllık istatistikleri incelendiğinde, "Gıda ürünlerinin imalatı" ve "Yiyecek ve içecek hizmeti faaliyetleri" sınıflarının iş kazası sonucu ölen sigortalı sayıları açısından ilk on sırada yer aldığı görülmektedir (SGK, 2024). Ekonomik faaliyet sınıflamasına bakıldığında, tehlikesiz olarak görülen gıda ürünlerinin imalatı sektörünün aslında azımsanmayacak sayıda iş kazası gerçekleşen bir sektör olduğu görülmektedir. 2024 yılı verileri incelendiğinde gıda ürünlerinin imalatı sektöründe 5 kadın 57 erkek olmak üzere toplam 62,

yiyecek içecek hizmeti faaliyetleri sektöründe 3 kadın 48 erkek olmak üzere 51 sigortalı çalışanın hayatını kaybettiği görülmüştür (SGK, 2024).

Tablo 3. 2024 Yılında İş Kazaları Sonucu En Çok Ölüm Meydana Gelen İlk 10 Sektör (SGK, 2024)

Sıra no	Kod No	Ekonomik Faaliyet Sınıflaması	İş kazası sonucu ölen sigortalı sayısı		
			Erkek	Kadın	Toplam
1	41	İkamet amaçlı olan ve ikamet amaçlı olmayan binaların inşaatı	346	2	348
2	49	Kara taşımacılığı ve boru hattı taşımacılığı	298	0	298
3	42	Bina dışı yapıların inşaatı	138	0	138
4	43	Özel inşaat faaliyetleri	66	0	66
5	25	Fabrikasyon metal ürünleri imalatı (makine ve teçhizat hariç)	53	10	63
6	10	Gıda ürünlerinin imalatı	57	5	62
7	23	Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı	59	0	59
8	46	Toptan ticaret	54	3	57
9	56	Yiyecek ve içecek hizmeti faaliyetleri	48	3	51
10	47	Perakende ticaret	42	6	48
		Toplam	1161	34	1190

3.2. Meslek Hastalıkları

Çoğu gıda fabrikasının mevcut yapısı, işçilerin üretkenliği artırmak için zorlu görevler üstlenip daha uzun saatler çalışmasını gerektiriyor. Bu durum, işle ilgili strese ve kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilir (Oxenburgh, Marlow, & Oxenburgh, 2004).

Bir çalışmanın bulguları, gıda işletmelerinde yetersiz iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının çalışan performansı üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ve bunun doğrudan üretkenlik kaybına yol açtığını göstermektedir. Mesleki hastalığa

maruz kalan çalışanların fiziksel kapasitelerinin azalması, iş süreçlerinde yavaşlamaya ve belirlenen üretim hedeflerinin karşılanamamasına neden olmaktadır. Ayrıca, sektörde çalışan personelin moral düzeyinin genel olarak düşük olduğu, İSG eğitimlerine gereken önemin verilmemesi nedeniyle yöneticilerin İSG'ye yönelik tutumlarının da büyük ölçüde yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, gıda sektöründe sürdürülebilir verimlilik ve çalışan sağlığının sağlanabilmesi için İSG uygulamalarının güçlendirilmesinin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır (Gaspar, Lima, & Lourenço, 2019).

Kim & Jeong (2024), gıda üretim sektöründe çalışan işçiler arasında uykuyla ilgili sorunların tükenmişlik ve kas-iskelet sistemi ağrılarıyla yakından ilişkili olduğunu ve kas-iskelet sistemi ağrılarının da çalışma ortamı ve iş-aile çatışmasıyla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.

4. GIDA SEKTÖRÜNDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ YÖNETİM STANDARTLARI

Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO), etkili bir iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemi oluşturmak amacıyla 2018 yılında OHSAS 18001'in yerine ISO 45001 standardını yürürlüğe koymuştur. Bu standardın uygulanması, işyeri tehlikelerini kontrol altına alarak çalışanların sağlıklı ve enerjik kalmasını ve verimliliklerini artırmayı amaçlamaktadır (Zwetsloot, Leka, Kines, & Jain, 2020). ISO 45001'in hayata geçirilmesi aynı zamanda güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturarak üretim verimliliğinin artmasına katkıda bulunur; iş kazaları, sağlıkla ilgili sorunlar ve devamsızlık oranlarında azalma sağlar (Fernández-Muñiz, Montes-Peón, & Vázquez-Ordás, 2009).

Ayrıca GMP, GHP ve HACCP uygulamaları iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarına da olumlu katkılar sağlayabilecektir. İyi Üretim Uygulamaları (GMP), FDA veya diğer yerel

düzenleyici kurumlar tarafından uygulanan ve tesislerin ve üretim süreçlerinin doğru tasarımını, izlenmesini ve kontrolünü sağlayarak, amaçlanan kullanım için tutarlı bir şekilde kaliteli ürünler üretilmesini güvence altına alan asgari gerekli düzenlemelerdir (Huynh-Ba, 2022). İyi Sağlık Uygulamaları (GHP), gıda hazırlama aşamaları için minimum sağlık gereksinimlerini belirleyen, gıda güvenliğini ve bireylerin sağlığını artırmayı amaçlayan önleyici bir program olarak kabul edilmektedir (Serafim, Stangarlin-Fiori, & Hecktheuer, 2018; De Lima, Medeiros, Dardin, & Stangarlin-Fiori, 2019). Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları (HACCP) ise gıdaları ve tüketicileri kimyasal, fiziksel ve biyolojik tehlikelerden/kirleticilerden korumak için sistematik önleyici yöntemler kullanan bir gıda güvenliği (gıda hijyeni olarak da bilinir) yaklaşımıdır (Awuchi, 2023).

5. SONUÇ

Gıda üretiminin gerçekleştiği işletmeler tüm sektörler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Çalışan sayısı yüksek ve üretim çeşitliliğine bağlı olarak ta tehlike kaynakları ve bu kaynaklardan ortaya çıkabilecek riskler de fazla ve şiddetli olabilmektedir. Üretim süreçlerinde fiziksel, kimyasal, biyolojik ve psikososyal risklerin bir arada bulunabilmektedir. Dolayısıyla bu işletmelerde sağlık ve güvenliği korumak amacıyla sistemli iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları gerekmektedir.

İlgili yönetmelikler doğrultusunda bu uygulamalar gerçekleştirilmeli ve çalışanların güvenlik kültürünün gelişmesi için de çeşitli politikalar benimsenmelidir. Kullanılması gereken kişisel koruyucu donanımların önemi vurgulanmalı ve kullanımı noktasında denetimler sıklaştırılmalıdır. İşletme düzeyinde de teknolojik gelişmeler takip edilerek otomasyon sistemlere geçiş

arttırılmalıdır. Böylelikle, daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir gıda üretim yapısının zemini oluşacaktır.

KAYNAKÇA

- Amiri, Z., Bayatian, M., & Mozafari, S. (2024). Numerical simulation application in occupational health studies: A review. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 30(3), 946–967. <https://doi.org/10.1080/10803548.2024.2369423>
- Awuchi, C. G. (2023). HACCP, quality, and food safety management in food and agricultural systems. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2176280. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2176280>
- Aydin, U., Canbey Özgüler, V., İlhan, M. N., DemiRkaya, S., & Kocabaş, F. (2018). Çalışma Ortamında Psikososyal Risk Etmenlerinin İş Kazası, Meslek Hastalıkları Ve İşle İlgili Hastalıklarla İlişkisi. *Sosyal Guvence*, (14). <https://doi.org/10.21441/sguz.2018.68>
- Benson, C., Dimopoulos, C., Argyropoulos, C. D., Varianou Mikellidou, C., & Boustras, G. (2021). Assessing the common occupational health hazards and their health risks among oil and gas workers. *Safety Science*, 140, 105284. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105284>
- Bilgin, Ö. N. (2021). *Kırklareli süt ve süt ürünleri fabrikalarının iş sağlığı ve güvenliği ile çevre yönetim sistemleri açısından değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kırklareli Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, Kırklareli.
- ÇALIK, İ., & DEMİR, O. (2015). İş Sağlığı Ve Güvenliği Kapsamında Konaklama Ve Yiyecek-İçecek İşyerlerinde Psikososyal Riskler. *Journal of International Social Research*, 8(41).
- Ceballos, D., Mead, K., & Ramsey, J. (2015). Recommendations to Improve Employee Thermal Comfort When Working

- in 40°F Refrigerated Cold Rooms. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(9), D216–D221. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1047023>
- Çetin, S. A., & Şahin, B. (2017). Gıda güvenliğinde risk faktörleri ve hijyenin önemi. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 5(Special Issue 2), 310–321.
- ÇSGB. (2023). 2022 Yılında Gıda Sektöründe İş Sağlığı Ve Güvenliği Programlı Teftişi. T.C. ÇALIŞMA VE SOSYAL GÜVENLİK BAKANLIĞI Rehberlik ve Teftiş Başkanlığı.
- Dalyan, O., Canpolat, E., Öztürk, Ö. F., & Pişkin, M. (2023). Gıda Sektöründe Çalışanların Salgın Hastalık Farkındalıkları: Çanakkale İli Örneği. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9(4), 952–963. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1246775>
- De Lima, D. P., Medeiros, C. O., Dardin, F. D., & Stangarlin-Fiori, L. (2019). Implementation of good hygiene practices in food trucks with and without the intervention of a food safety expert. *Journal of Food Safety*, 39(3), e12637. <https://doi.org/10.1111/jfs.12637>
- Demirer, A., & Kayhan, E. (2016). Polimer İşleme Teknolojisinde Meslek Hastalıkları. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(3). <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.40070>
- Duman, O., & Bozkurt, Y. (2021). İş Sağlığı ve Güvenliğinde Metal İşleme Sıvıları. *OHS ACADEMY*, 4(1), 27–43. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.822861>
- Erkmen, O. (2010). *Gıda kaynaklı tehlikeler ve güvenli gıda üretimi*. 53(3), 220–235.
- Evtushenk, O., Siryk, A., & Zomchak, V. (2019). Alysis of Causes, Circumstances andConsequences of

Occupational Traumatic Injuries at the Food Beverage Enterprises. *Ukrainian Journal of Food Science*, 7.

Fernández-Muñiz, B., Montes-Peón, J. M., & Vázquez-Ordás, C. J. (2009). Relation between occupational safety management and firm performance. *Safety Science*, 47(7), 980–991. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.022>

Gaspar, P. D., Lima, T., & Lourenço, M. (2019). Relevant occupational health and safety risks in the Portuguese food processing industry. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 3(3), 23–33.

Girard, S.-A., Leroux, T., Courteau, M., Picard, M., Turcotte, F., & Richer, O. (2015). Occupational noise exposure and noise-induced hearing loss are associated with work-related injuries leading to admission to hospital. *Injury Prevention*, 21(e1), e88–e92. <https://doi.org/10.1136/injuryprev-2013-040828>

Huynh-Ba, K. (2022). Good Manufacturing Practices (GMPs) and the Quality Systems. In K. Huynh-Ba (Ed.), *Analytical Testing for the Pharmaceutical GMP Laboratory* (1st ed., pp. 26–56). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119680475.ch2>

İSGGM. (2024). *Gıda Ürünleri ve İçecek İmalatı Sektöründe İş Sağlığı Gözetimi Rehberi*. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü.

Kim, J. W., & Jeong, B. Y. (2024). Food Manufacturing Workers and Structural Causality among Work Environment, Work–Family Conflict, Musculoskeletal Pain, Sleep-Related Problems, and Burnout. *Applied Sciences*, 14(17), 7489. <https://doi.org/10.3390/app14177489>

- Leka, S., & Cox, T. (2008). The European framework for psychosocial risk management: PRIMA-EF. Nottingham: Institute of Work. *Health and Organization*.
- Li, J., Qin, Y., Guan, C., Xin, Y., Wang, Z., & Qi, R. (2022). Lighting for work: A study on the effect of underground low-light environment on miners' physiology. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(8), 11644–11653. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16454-1>
- Liberatore, K. R. (2007). The application of computerized content analysis of speech to the expression of occupational stress in a multicultural sample of workers in the United States meat industry (Ph.D., Alliant International University, Los Angeles). Alliant International University, Los Angeles, United States -- California. ProQuest Dissertations & Theses Global (304705067). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/application-computerized-content-analysis-speech/docview/304705067/se-2?accountid=15819>
- Lie, A., Skogstad, M., Johannessen, H. A., Tynes, T., Mehlum, I. S., Nordby, K.-C., ... Tambs, K. (2016). Occupational noise exposure and hearing: A systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 89(3), 351–372. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1083-5>
- Musolin, K., Ramsey, J. G., Wassell, J. T., & Hard, D. L. (2014). Prevalence of carpal tunnel syndrome among employees at a poultry processing plant. *Applied Ergonomics*, 45(6), 1377–1383. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.03.005>
- Olçay, Z. F. (2019). Mutfakta iş sağlığı ve güvenliği. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 14(53), 21–34.

- Oxenburgh, M., Marlow, P. S., & Oxenburgh, A. (2004). *Increasing productivity and profit through health and safety: The financial returns from a safe working environment*. CRC press.
- Parlak, T. (2017). *Gıda Sanayinde İş Sağlığı Ve Güvenliği Uygulamaları Sakız-Şekerleme Üretim Fabrikası Örneği*. İstanbul Gedik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Parlak, T. (2021). Çay Toplama İşlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi. *OHS ACADEMY*, 4(2), 21–42. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.870959>
- Sanaye, S., Baburajan, S., Pawar, S., Nalawade, S., & Sapra, B. (2012). Occupational exposures in industrial application of radiation during 1999-2008. *Radiation Protection and Environment*, 35(1), 17. <https://doi.org/10.4103/0972-0464.111405>
- Seng, M., Ye, M., Choy, K., & Ho, S. F. (2018). Heat stress in rice vermicelli manufacturing factories. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 24(3–4), 119–125. <https://doi.org/10.1080/10773525.2018.1522102>
- Serafim, A. L., Stangarlin-Fiori, L., & Hecktheuer, L. H. R. (2018). Good handling practices in food and beverage areas of hotels: Evaluation of improvements achieved versus financial investments. *Journal of Food Safety*, 38(6), e12543. <https://doi.org/10.1111/jfs.12543>
- SGK. (2024). *İş Kazası ve Meslek Hastalığı İstatistikleri -(4a)*. Sosyal Güvenlik Kurumu.
- Şimşek, B. (2023). *Çalışanların Fiziksel Risk Etmenlerine Yönelik Maruz Kalma Algısının İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Strom, D. J. (2003). *Health Impacts from Acute Radiation Exposure* (No. PNNL-14424, 15020969; p. PNNL-14424, 15020969). <https://doi.org/10.2172/15020969>
- Tak, S., Davis, R. R., & Calvert, G. M. (2009). Exposure to hazardous workplace noise and use of hearing protection devices among US workers—NHANES, 1999–2004. *American Journal of Industrial Medicine*, 52(5), 358–371. <https://doi.org/10.1002/ajim.20690>
- Thetkathuek, A., Yingratanasuk, T., Jaidee, W., & Ekburanawat, W. (2015). Cold Exposure and Health Effects Among Frozen Food Processing Workers in Eastern Thailand. *Safety and Health at Work*, 6(1), 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.10.004>
- Yağımlı, M. (2017). *İş Sağlığı ve Güvenliği* (2nd ed.). Beta Yayınları.
- Zwetsloot, G., Leka, S., Kines, P., & Jain, A. (2020). Vision zero: Developing proactive leading indicators for safety, health and wellbeing at work. *Safety Science*, 130, 104890. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104890>

DİJİTAL İZLENEBİLİRLİK SİSTEMLERİ VE AKILLI AMBALAJLAMA TEKNOLOJİLERİNİN GIDA GÜVENLİĞİ AÇISINDAN BÜTÜNCÜL DEĞERLENDİRİLMESİ

Zeynep Görkem CERİT¹

1. GİRİŞ

Küresel gıda tedarik zincirleri son yıllarda hem yapısal olarak karmaşılaşmış hem de çevresel, ekonomik ve teknolojik faktörler nedeniyle daha kırılgan hâle gelmiştir (FAO, 2022). Artan tüketici talebi, uzun ve çok aşamalı tedarik zincirleri, uluslararası ticaretin hızlanması, iklim değişikliği ve gıda patojenlerinde gözlenen adaptasyon gibi dinamikler, gıda güvenliğini tehdit eden olayların daha sık görülmesine neden olmaktadır (Nguyen ve ark., 2021). Bu durum, klasik gıda güvenliği yaklaşımlarının ötesine geçilmesini zorunlu kılmakta; gıda zincirinde şeffaflık, gerçek zamanlı izleme, erken uyarı sistemleri ve veri temelli karar verme süreçlerinin önemini artırmaktadır (Nagessa ve ark., 2022; Wolniak, ve ark., 2025). Bu bağlamda dijital izlenebilirlik sistemleri ile akıllı ambalaj teknolojilerinin entegrasyonu, modern gıda güvenliği stratejilerinin kilit bileşenleri hâline gelmiştir.

Dijital izlenebilirlik sistemleri, gıda ürününün üretim noktasından tüketiciye ulaşıncaya kadar geçtiği tüm aşamaları kayıt altına alarak tedarik zincirinde kapsamlı bir görünürlük sağlar. IoT (nesnelerin interneti) tabanlı sensörler, RFID ve NFC

¹ Öğr. Gör. Zeynep Görkem CERİT, Ankara Üniversitesi Kalecik Meslek Yüksek Okulu Gıda Teknolojisi Programı, ORCID: 0000-0003- 3955-9584.

etiketleri, blokzincir platformları ve bulut tabanlı veri yönetim sistemleri, izlenebilirliği gerçek zamanlı, güvenilir ve manipülasyona kapalı hâle getirebilmektedir (Cao ve ark., 2023). Diğer yandan akıllı ambalajlama, ambalajın pasif bir koruyucu olmaktan çıkıp çevresel faktörlere reaksiyon verebilen, tazeliği izleyebilen, mikrobiyel kontaminasyonu gösterebilen ve tüketiciyi bilgilendirebilen aktif bir bileşen hâline gelmesi anlamına gelir (Kuswandi, 2017; Realini ve ark., 2014).

Bu iki teknolojinin bütünleşik bir yaklaşımla değerlendirilmesi, hem gıda güvenliğine sistemsel bir katkı sağlar hem de üretici, perakendeci ve tüketici için çok boyutlu faydalar yaratır (Al-Thani ve ark., 2025). Bu bölüm, dijital izlenebilirlik ve akıllı ambalaj teknolojilerini tek çatı altında bütüncül bir perspektifle incelemeyi, bu sistemlerin avantajlarını, sınırlılıklarını ve geleceğe yönelik potansiyellerini tartışmayı amaçlamaktadır.

2. GIDA GÜVENLİĞİNDE YENİ NESİL TEHDİTLER

Gıda tedarik zincirlerinin küreselleşmesi, iklim değişikliğinin etkileri, dijitalleşmenin hızlanması ve tüketici beklentilerinin dönüşmesi, gıda güvenliğini tehdit eden risklerin niteliğini önemli ölçüde değiştirmiştir. Geleneksel patojen kaynaklı risklerin yanı sıra, günümüzde iklim temelli gıda güvenliği tehditleri, yeni kontaminant türleri, siber güvenlik açıkları, karmaşık tedarik zinciri riskleri ve acil durum kaynaklı kırılganlıklar giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Plakantara ve ark., 2025).

Son yıllarda en kritik tehdit alanlarından biri iklim değişikliğinin gıda güvenliği üzerindeki etkileridir. Sıcaklık artışı, ekstrem hava olayları ve su kaynaklarındaki azalma; mikrobiyel patojenlerin yayılımını hızlandırmakta, toksin

üretimini artırmakta ve kontaminasyon risklerini yeniden şekillendirmektedir (Wang ve ark., 2024). Özellikle mikotoksin oluşumunun iklim değişikliğine bağlı olarak artış göstermesi, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) raporlarında kritik bir tehdit olarak vurgulanmaktadır (EFSA, 2020). Yüksek sıcaklık ve nem koşullarının birleşimi, *Aspergillus* türlerinin ürettiği aflatoksinlerin tahıllarda, kuru yemişlerde ve süt ürünlerinde daha yüksek oranlarda tespit edilmesine yol açmaktadır (Battilani ve ark., 2016). Bu durum hem halk sağlığı hem de ticari kayıplar açısından önemli bir risk oluşturmaktadır.

Yeni nesil tehditlerden bir diğeri kimyasal kontaminantların çeşitliliğinin artmasıdır. Endüstriyel faaliyetlerin, pestisit kullanımının ve ambalaj malzemesi teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte gıda zincirine karışabilen kimyasal maddelerin profili değişmiştir. Özellikle kalıcı organik kirleticiler (Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances, PFAS) mikroplastikler ve nanopartiküller son yıllarda dikkat çeken kirleticilerdir. Mikroplastiklerin balık ve deniz ürünleri başta olmak üzere birçok gıdada tespit edilmesi, biyobirikim ve uzun vadeli toksisite açısından ciddi endişelere yol açmaktadır (Smith ve ark., 2018). Ayrıca gıda ambalajlarından geçen ftalatlar ve bisfenol A gibi maddeler endokrin bozucu etkileri nedeniyle risk oluşturmaya devam etmektedir.

Küreselleşen tedarik zincirlerinin artan karmaşıklığı da izlenebilirlik sorunlarını derinleştiren modern bir tehdit olarak öne çıkmaktadır. Bir gıda ürününün üretim süreci uluslararası birçok noktaya dağılmış durumdadır ve tedarik zincirinde herhangi bir halkada yaşanan sorun, geniş ölçekli geri çağırımlara neden olabilmektedir. Örneğin 2013 yılında yaşanan Avrupa at eti skandalı, izlenebilirlik eksikliğinin gıda sahtekârlığıyla birleştiğinde ne kadar büyük çaplı krizlere yol açabileceğini göstermiştir. Bu olayda, farklı ülkelerde çok sayıda üretici ve dağıtıcı zinciri karışmış, ürünlerin gerçek içeriğinin

izlenmesi oldukça güçleştiği bildirilmiştir (Di Pinto ve ark., 2015).

Yeni nesil tehditlerden biri de gıda sahtekârlığının artan dijital boyutudur. Ekonomik kazanç sağlamak amacıyla yapılan gıda hileleri, özellikle yüksek değerli ürünlerde önemli risk oluşturmaktadır. Bal, zeytinyağı, baharat ve organik ürünler en sık hile yapılan kategorilerdendir. Sahtekârlığın tespitini daha zorlaştıran faktör, küresel ticarete dijital belgelerin manuel kontrolünün yetersiz kalmasıdır. Bu durum, blokzincir tabanlı izlenebilirlik çözümlerinin gelişimini hızlandırmıştır (Cao ve ark., 2023; Kurt ve ark., 2025).

Son olarak, tüketici davranışlarındaki değişim de yeni nesil tehditler arasında değerlendirilebilir. Online gıda satın alımının artması, ev dışı tüketimden farklı riskler ortaya çıkarmaktadır. Soğuk zincirin korunması, teslimat süreçlerinin hijyeni ve hızlı dağıtım modellerinin güvenlik gereklilikleri literatürde giderek daha fazla tartışılmaktadır (Shroff ve ark., 2022).

Bu kapsamlı tehdit profili, gıda güvenliği yönetim sistemlerinin daha proaktif, dijital destekli ve veri temelli bir yapıya dönüşmesini zorunlu kılmaktadır. Yeni nesil tehditlerin çok boyutlu yapısı, risk analizi süreçlerinin güncellenmesi ve tedarik zinciri boyunca dinamik bir izleme gerekliliği doğurmuştur.

3. DİJİTAL İZLENEBİLİRLİK SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ

Dijital izlenebilirlik, gıda tedarik zincirinin tüm aşamalarını dijital veri akışı üzerinden görünür kılmayı hedefleyen bütünselik bir sistemdir. Bu yapı, üretimden dağıtıma kadar oluşan süreçlerin kaydedilmesini, doğrulanmasını ve

gerektiğinde hızlı bir biçimde geriye dönük izlenmesini sağlar. Son yıllarda özellikle IoT tabanlı sensörler, RFID/NFC etiketleme, blokzincir sistemleri ve bulut tabanlı veri mimarileri dijital izlenebilirliğin temel bileşenleri hâline gelmiştir (Pal ve ark., 2023).

IoT teknolojilerinin gıda sektöründe uygulanabilirliği, sıcaklık ve nem gibi kritik kalite parametrelerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayarak gıda taşımacılığında soğuk zincirin bütünlüğünü artırır. IoT sensörleri sıcaklık, nem, CO₂ düzeyi, ürün konumu, titreşim, ışık maruziyeti gibi kritik kalite parametrelerini gerçek zamanlı olarak ölçer. Bu sensörler üretim tesislerinde, kamyonlarda, depolarda ve market raflarında kullanılabilir. Ben-Daya ve ark. (2017), IoT tabanlı sıcaklık sensörlerinin tedarik zinciri boyunca kalite kayıplarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bu tür sensörler aracılığıyla elde edilen veriler, merkezi yazılımlar üzerinden otomatik olarak depolanmakta ve kalite riskinin erken aşamada belirlenmesine olanak tanımaktadır.

RFID ve NFC etiketleri de izlenebilirliğin önemli bileşenlerindendir. RFID etiketleri, ürünün kimliğini otomatik olarak tanımlayan ve veri depolayabilen çiplerdir. Avantajı, temassız ve hızlı veri okumasıdır. RFID teknolojisi, ürünlerin temassız ve hızlı biçimde tanımlanmasını sağladığı için özellikle yüksek hacimli operasyonlarda manuel takibe göre çok daha verimlidir. Aung ve Chang (2014), RFID tabanlı izleme sistemlerinin tedarik zinciri performansını artırdığını ve hatalı parti eşleşmelerinin önüne geçtiğini rapor etmiştir. Bunun yanı sıra NFC etiketleri tüketiciye doğrudan bilgi aktarma kapasitesiyle ön plana çıkmakta, ürünün menşei, üretim tarihi ve depolama koşulları gibi verilerin mobil cihazlar üzerinden görüntülenmesine imkân tanımaktadır.

Dijital izlenebilirliğin bir diğer temel bileşeni blokzincir teknolojisidir. Blokzincirin değiştirilemez ve merkeziyetsiz yapısı, gıda zincirindeki kayıt manipülasyon riskini ortadan kaldırmakta ve veri güvenilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Cao ve ark. (2023) blokzincir tabanlı izleme sistemlerinin özellikle sürdürülebilirlik göstergelerinin tüketiciyle doğru ve şeffaf şekilde paylaşılmasında kritik rol oynadığını belirtmiştir. IBM Food Trust uygulamasının tedarik zincirindeki izlenebilirlik performansını saniyeler düzeyine indirmesi (Hayati ve ark., 2018) bu teknolojinin pratik faydasını vurgulayan somut bir örnektir.

Bu dijital sistemler yalnızca veri toplamakla kalmamakta; aynı zamanda bulut tabanlı veri analitiği ile bütünleştirildiğinde tedarik zinciri boyunca karar verme süreçlerini destekleyen bir altyapıya dönüşmektedir. Manning ve Soon (2016), dijital izlenebilirliğin risk analizi süreçlerine entegrasyonunun gıda işletmelerinde daha proaktif bir gıda güvenliği kültürü oluşturduğunu vurgulamaktadır. Böylelikle işletmeler yalnızca olay sonrası müdahale eden bir yapıdan, riskleri gerçekleşmeden önce tespit edebilen bir modele geçiş yapmaktadır.

4. DİJİTAL İZLENEBİLİRLİĞİN GIDA GÜVENLİĞİNE KATKISI

Dijital izlenebilirlik teknolojilerinin gıda güvenliğine katkısı, özellikle erken uyarı, kontaminasyon kaynağının hızlı belirlenmesi, geri çağırma süreçlerinin etkinliği ve gıda sahteciliğinin azaltılması açısından belirginleşmektedir. IoT tabanlı izleme sistemleri, soğuk zincir bozulmalarının veya fiziksel çevresel parametrelerdeki ani değişikliklerin gerçek zamanlı olarak tespit edilmesini sağlar. Örneğin, Galanakis (2020), sıcaklık ihlallerinin erken belirlenmesinin mikrobiyel riskleri önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Bu tür gerçek

zamanlı uyarılar, özellikle taze et, deniz ürünleri ve süt ürünlerinde kritik öneme sahiptir.

Dijital izlenebilirliğin en önemli faydalarından biri, gıda kaynaklı hastalık durumlarında kontaminasyon kaynağının hızla belirlenebilmesidir. Tsoulfas ve ark. (2023), tedarik zinciri verilerinin bütünsel biçimde dijital olarak tutulmasının, epidemiyolojik araştırmaların süresini kısalttığını ve potansiyel salgınların geniş alana yayılmasını engellediğini belirtmiştir. Geleneksel izleme yöntemleri ile haftalar alan kaynak bulma sürecinin blokzincir tabanlı sistemlerde birkaç saniyede gerçekleştirilebildiği çeşitli vakalarla gösterilmiştir (Wang ve ark., 2022).

Geri çağırma süreçlerinin hızlanması da gıda güvenliği açısından kritik bir diğer kazanımdır. Geleneksel sistemlerde tüm ürünlerin geri çağırılması yaygın olmakla birlikte, dijital izlenebilirlik yalnızca riskli partilerin belirlenmesini sağlar. Bu durum hem ekonomik kayıpları azaltır hem de gereksiz ürün israfını önler. EFSA (2020), izlenebilirlik sistemlerinin etkin kullanılması hâlinde geri çağırma maliyetlerinin %50'den fazla azaltılabileceğini rapor etmektedir.

Tüketici güveninin artması da dijital izlenebilirliğin önemli çıktılardan biridir. NFC etiketleri aracılığıyla tüketiciye doğrudan sunulan ürün geçmişi bilgisi, özellikle organik, premium veya hassas kategorili gıdalarda satın alma kararlarını olumlu yönde etkilemektedir. Yıldırım ve ark. (2017), akıllı ambalaj bileşenlerinin tüketicilerin gıda güvenliği algısını güçlendirdiğini ve ürün kalitesiyle ilgili subjektif kaygıları azalttığını bildirmiştir.

Son olarak dijital izlenebilirlik, gıda sahteciliğinin azaltılması açısından önemli bir araçtır. Bal, zeytinyağı, et ürünleri gibi sahteciliğe açık kategorilerde blokzincir tabanlı kayıt sistemleri, ürün kimliğini doğrulanabilir hâle getirir.

Wolniak ve Grebski (2025), Avrupa Birliği'nde Gıda ve Yem için Hızlı Uyarı Sistemi (Rapid Alert System for Food and Feed, RASFF) bildirimlerinin önemli bir kısmının sahtecilik kaynaklı olduğunu bildirmiş ve dijital izlenebilirliğin bu alanda kritik bir gereklilik hâline geldiğini vurgulamıştır.

5. AKILLI AMBALAJLAMA SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ

Akıllı ambalajlama sistemleri, ürünün depolama, taşıma ve raf ömrü boyunca maruz kaldığı çevresel, kimyasal ve biyolojik değişimleri algılayarak üretici, perakendeci veya tüketiciyi bilgilendirebilen yenilikçi ambalaj teknolojileridir. Bu sistemlerde yer alan sensör, indikatör ve dijital izleme bileşenleri sayesinde ambalaj, pasif bir koruyucu olmaktan çıkarak gıda güvenliğinde aktif bir bilgi sağlayıcı hâline gelmektedir. Akıllı ambalaj kavramı, gıda ürünlerine ilişkin kalite ve güvenlik bilgilerini görsel, kimyasal veya dijital sinyallerle ileten bir yapıya sahiptir (Yıldırım ve ark., 2017).

Bu teknolojiler, ürünün gerçek zamanlı durumu hakkında geri bildirim sağlayarak hem tedarik zincirindeki belirsizlikleri azaltmakta hem de gıda kaynaklı risklerin daha erken aşamada kontrol edilmesine imkân tanımaktadır. IoT ve RFID gibi dijital izleme teknolojilerinin entegrasyonu ile akıllı ambalajlar, ürünün tazeliği, sıcaklık geçmişi ve bozulma seviyeleri gibi parametreleri kaydedip dijital platformlara aktarabilmektedir (Pal ve ark., 2020). Bu bütünleşik yapı, hem tedarik zinciri yönetimini hem de tüketici bilgilendirme mekanizmalarını daha güvenilir hâle getirir.

6. AKILLI AMBALAJ SENSÖR TEKNOLOJİLERİ

Akıllı ambalaj sistemlerinin merkezinde, ürün kalitesini ve güvenliğini izleyen sensör teknolojileri yer almaktadır. Bu sensörler, gıda bozulmasıyla ortaya çıkan kimyasal ve biyolojik değişimleri algılayarak ürünün tüketilebilirlik durumu hakkında kritik bilgiler sunar.

pH sensörleri, özellikle et ve balık ürünlerinde mikrobiyal faaliyet sonucu oluşan uçucu bazik bileşiklerin neden olduğu pH artışlarını renk değişimi aracılığıyla gösterir. Kuswandi ve ark. (2011), doğal pigment bazlı pH indikatörlerinin tazelik değerlendirmesinde hem güvenli hem ekonomik bir alternatif olduğunu bildirmiştir.

Gaz sensörleri, ambalaj içerisindeki oksijen, karbondioksit ve azot gibi gazların seviyelerini ölçerek bozulma sürecini doğrudan takip eder. Oksijen seviyesi ambalaj bütünlüğünü, karbondioksit seviyesi mikrobiyal aktiviteyi, amonyak ise özellikle protein bazlı gıdalardaki bozulmayı yansıtır (Ahari ve ark., 2021).

Zaman-sıcaklık göstergeleri (TTI), ürünün tedarik zinciri boyunca karşılaştığı sıcaklık geçmişini doğrusal olarak takip eder ve soğuk zincir bozulmalarını tespit eder. TTI teknolojileri özellikle taze et, deniz ürünleri ve dondurulmuş gıdalar için kritik doğrulama araçları olarak kullanılmaktadır (Janjarasskul ve ark., 2018).

Biyosensörler, DNA, enzim veya antikor temelli yapıları sayesinde patojenleri yüksek hassasiyetle tespit edebilir. Nanoteknolojik gelişmeler, bu sensörlerin hassasiyetini artırmış ve *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* gibi patojenlerin hızlı tespiti mümkün hâle gelmiştir (Hayati ve ark, 2018).

7. AKILLI AMBALAJ MALZEMELERİ VE TEKNOLOJİLERİ

Akıllı ambalaj sistemlerinin uygulanabilirliği büyük ölçüde kullanılan malzemelerin yapısına bağlıdır. Son yıllarda biyobozunur polimerler, nanokompozit filmler ve fonksiyonel katkıları hem ürün güvenliğini artırmış hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemiştir. PLA, PHA gibi biyobozunur polimerler, hem çevre dostu olmaları hem de fonksiyonelleştirilmeye uygun yapıları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Yıldırım ve ark., 2017).

Nanoteknoloji, akıllı ambalaj malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir ivme oluşturmıştır. Gümüş ve çinko oksit nanopartiküllerinin portakal suyunda antimikrobiyal özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada bu nanopartiküllerin kontaminasyonu azaltıp portakal suyunun raf ömrünü uzattığı bildirilmiştir (Yıldırım ve ark., 2017).

Renk değiştirici indikatörler, çevresel pH veya gaz seviyelerine tepki olarak renk değiştiren antosiyanin veya kurkumin gibi doğal pigmentlerden oluşturulur. Bu materyaller hem toksik olmayan bileşenleri hem de tüketiciye görsel uyarı verebilme özellikleri ile öne çıkar (Janjarasskul ve ark., 2018).

RFID-sensör entegrasyonu, akıllı ambalaj teknolojilerinin dijital izlenebilirlik sistemleriyle bütünleşmesini sağlar. Bu sistemlerde ambalaj içerisine gömülen RFID etiketleri sıcaklık, nem ve gaz profilleri gibi kalite parametrelerini tedarik zinciri boyunca sürekli olarak raporlayabilir. Pal ve ark. (2020), RFID tabanlı izleme sistemlerinin gıda tedarik zincirlerinde bilgi bütünlüğünü artırdığını ve insan hatasını önemli ölçüde azalttığını belirtmiştir.

8. DİJİTAL İZLENEBİLİRLİK İLE AKILLI AMBALAJ SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU

Dijital izlenebilirlik teknolojilerinin akıllı ambalaj sistemleriyle entegrasyonu, gıda tedarik zincirinde gerçek zamanlı kalite izlemesinin sağlanması açısından kritik bir dönüm noktasıdır. Akıllı ambalajlara entegre edilen pH, gaz, biyosensör ve zaman-sıcaklık göstergeleri gibi sensörler; ürünün kimyasal, biyolojik ve fiziksel durumuna ilişkin sürekli veri üretir. Bu veriler RFID ve NFC tabanlı izleme sistemleri aracılığıyla dijital platformlara aktarılır; böylece üretimden tüketime kadar kesintisiz bir izlenebilirlik sağlanır (Hayati ve ark., 2018; Pal ve ark., 2023).

Endüstri 4.0 altyapıları ve IoT uygulamaları, sensör verilerinin otomatik toplanması ve analiz edilmesini kolaylaştırırken, blokzincir teknolojisi sağlanan verilerin değiştirilemez bir yapıda depolanmasını mümkün kılarak gıda sahteciliği riskini azaltır (Ben-Daya ve ark., 2017). Bu entegrasyon, soğuk zincir boyunca yaşanan sıcaklık kırılmalarının anında tespit edilmesine, raf ömrü tahminlerinin daha doğru şekilde yapılmasına ve kontaminasyon durumlarında kaynağın hızlı şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Mani ve ark., 2025; Kuswandi ve ark., 2011). Ayrıca tüketiciler akıllı telefon uygulamaları ile ürünün geçmişini görüntüleyebilir ve bu durum güven duygusunu artırır (Janjarasskul ve ark, 2018).

Bununla birlikte sistemin yaygınlaşmasının önünde bazı sınırlılıklar bulunmaktadır. Sensör maliyetleri ve uzun süreli stabilite sorunları, veri güvenliği gereksinimleri ve blokzincir teknolojilerinin işlem maliyetleri, entegrasyonun uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır (Ahari ve ark, 2021). Ayrıca üreticilerin teknolojiyi benimseme hızının düşük olması ve

tüketici alışkanlıklarının değişime direnç göstermesi, entegrasyonun yaygın kabulünü sınırlayan diğer faktörlerdir.

9. SONUÇ

Gıda güvenliği alanında ortaya çıkan yeni nesil tehditlerin karmaşıklığı, geleneksel yöntemlerle yönetilemeyecek kadar çok boyutlu bir hâl almıştır. Bu nedenle dijital izlenebilirlik, akıllı ambalaj teknolojileri ve yapay zekâ destekli analiz sistemlerinin bir arada kullanıldığı bütüncül yaklaşım, geleceğin gıda güvenliği stratejisinin temelini oluşturmaktadır. Sensör tabanlı sürekli izleme, blokzincir ile doğrulanabilir kayıt tutma ve big data analitiği, hem kontaminasyon olaylarının erken tespitini sağlayacak hem de sahtekârlıkla mücadelede güçlü bir mekanizma sunacaktır.

Bu teknolojilerin akademik anlamda geliştirilme potansiyeli oldukça yüksektir; özellikle nanoteknoloji, malzeme bilimi, veri bilimi ve endüstri mühendisliği disiplinleri arasındaki işbirliği giderek daha kritik hâle gelmektedir. Endüstri açısından bakıldığında ise bu teknolojiler, operasyonel verimlilik, risk yönetimi ve sürdürülebilirlik performansını iyileştirerek rekabet avantajı sağlamaktadır. Gıda israfının azaltılması, soğuk zincirin güvence altına alınması ve tüketici güveninin artırılması, bu bütüncül yaklaşımın sürdürülebilir gıda sistemlerine doğrudan katkılarından. Bu çerçevede, geleceğin gıda zincirleri daha şeffaf, daha güvenilir ve daha dayanıklı bir yapıya doğru evrilmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahari, H., & Soufiani, S. P. (2021). Smart and active food packaging: Insights in novel food packaging. *Frontiers in Microbiology*, 12, 657233. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.657233>
- Al-Thani, M. J., Hadid, M., Padmanabhan, R., Kerbache, L., & Elomri, A. (2025). Smart food supply chain management: A bibliometric and systematic review. *Food and Humanity*, 5, 100736. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100736>
- Aung, M. M., & Chang, Y. S. (2014). Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control*, 39, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.007>
- Battilani, P., Toscano, P., Van der Fels-Klerx, H. et al. (2016). Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci Rep* 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahrour, Z. (2017). Internet of things and supply chain management: A literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4719–4742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140>
- Di Pinto, A., Bottaro, M., Bonerba, E., Bozzo, G., Ceci, E., Marchetti, P., Mottola, A., & Tantill, G. Occurrence of mislabeling in meat products using DNA-based methods. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 2479–2484. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1552-y>
- European Food Safety Authority (EFSA), Maggiore, A., Afonso, A., Barrucci, F., & De Sanctis, G. (2020). Climate change as a driver of emerging risks for food and feed safety,

- plant, animal health and nutritional quality. EFSA Supporting Publications, EN-1881. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2020.EN-1881>
- Galanakis, C. M. (2020). The Food Systems in the Era of the Coronavirus (COVID-19) Pandemic Crisis. *Foods*, 9(4), 523. <https://doi.org/10.3390/foods9040523>
- Hayati, H., & Nugraha, I. G. B. B. (2018). Blockchain based traceability system in food supply chain. In 2018 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI). 120–125). Yogyakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ISRITI.2018.8864477>
- Janjarasskul, T., & Suppakul, P. (2018). Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(5), 808–831. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1225278>
- Mani, R., Kumar, J. V., Murugesan, B., Alaguthevar, R., & Rhim, J.-W. (2025). Smart sensors in food packaging: Sensor technology for real-time food safety and quality monitoring. *Journal of Food Process Engineering*, 48(4), e70120. <https://doi.org/10.1111/jfpe.70120>
- Nagessa, W. B., Mukunda, F. L., & Abdi, G. G. (2022). Food security and safety during novel coronavirus (COVID-19). *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, 8(2), 166–172. <https://doi.org/10.17352/2455-815X.000159>
- Cao, S., Johnson, H., & Tulloch, A. (2023).. *Procedia Computer Science*, 217, 1437–1445. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.342>
- FAO. (2022). The State of Food Security and Nutrition in the World. Food and Agriculture Organization.

- Kurt, S., & Kocaoğlu, B. (2025). Küresel Krizler Karşısında Tedarik Zinciri Dirençliliği: Sistemik Yazın Taraması. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25(3), 50-78. <https://doi.org/10.18037/ausbd.1588866>
- Kuswandi, B. (2017). Freshness sensors for food packaging. *Reference Module in Food Science*, 9780081005965. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21876-3>
- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Jayus, Abdullah, A., & Ahmad, M. (2011). Smart packaging: Sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensors and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5(3-4), 137-146. <https://doi.org/10.1007/s11694-011-9120-x>
- Manning, L., & Soon, J. M. (2016). Food safety, food fraud, and food defense: A fast evolving literature. *Journal of Food Science*, 81(4), 823-834. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13256>
- Nguyen, T. T. B., & Li, D. (2021). A systematic literature review of food safety management system implementation in global supply chains. *British Food Journal*, 124(10), 3014-3031. <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2021-0476>
- Pal, A., & Kant, K. (2020). Smart sensing, communication, and control in perishable food supply chain. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 16(1), Article 12. <https://doi.org/10.1145/3360726>
- Pal, K., & Yasar, A.-U.-H. (2023). Internet of Things impact on supply chain management. *Procedia Computer Science*, 220, 478-485. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.03.061>
- Plakantara, S. P., & Karakitsiou, A. (2025). Transforming agrifood supply chains with digital technologies: A systematic review of safety and quality risk management.

- Operations Research Forum, 6, 113.
<https://doi.org/10.1007/s43069-025-00511-3>
- Realini, C. E., & Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for food applications. *Meat Science*, 98(3), 404-419.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.031>
- Shroff, A., Shah, B. J., & Gajjar, H. (2022). Online food delivery research: A systematic literature review. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 34(8), 2852–2883. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-10-2021-1273>
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>
- Tsoufas, G. T., Trivellas, P., Reklitis, P., & Anastasopoulou, A. (2023). A Bibliometric Analysis of Short Supply Chains in the Agri-Food Sector. *Sustainability*, 15(2), 1089. <https://doi.org/10.3390/su15021089>
- Wang, L., He, Y., & Wu, Z. (2022). Design of a Blockchain-Enabled Traceability System Framework for Food Supply Chains. *Foods*, 11(5), 744. <https://doi.org/10.3390/foods11050744>
- Wang, G., Lee, S., Yi, Y., Wang, Y., & Shin, C. (2024). Digital technology increases the sustainability of cross-border agro-food supply chains: A review. *Agriculture*, 14(6), 900. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060900>
- Wolniak, R., & Grebski, W. W. (2025). Food safety in the European Union: A comparative assessment based on RASFF notifications, pesticide residues, and food waste

indicators. Foods, 14(14), 2501.
<https://doi.org/10.3390/foods14142501>

Yıldırım, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., Radusin, T., Suminska, P., Marcos, B., & Coma, V. (2017). Active packaging applications for food. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17(1), 165-199.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12322>

MOR PATATES (*SOLANUM TUBEROSUM* L.VAR. İLK MOR) EKSTRAKTLARININ (SU, ETANOL VE METANOL) VE SAFLAŞTIRILMIŞ ANTOSİYANİNLERİNİN GIDA KAYNAKLI BAKTERİLERE KARŞI ANTİBAKTERİYEL ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Zuhal ŞAHİN^{1*}

Tülay DURAN²

1. GİRİŞ

Patates (*Solanum tuberosum* L.), dünya çapında besin güvenliği ve ekonomik önemi yüksek bir kök sebzidir. Geleneksel krem ve beyaz patates çeşitlerine ek olarak, kırmızı ve mor pigmentli patates çeşitleri, hücre ve tuber düzeyinde zengin antosiyanin profilleri nedeniyle son yıllarda hem besin değeri hem de fonksiyonel gıdalar bağlamında oldukça ilgi görmüştür. Antosiyaninler, flavonoid sınıfı fenolik bileşikler olup bitki hücrelerinde mor, kırmızı ve mavi renkleri oluşturan temel moleküllerdir. Patateslerde başlıca petunidin, malvidin, delphinidin, pelargonidin gibi antosiyanidin türevleri saptanmıştır; bunların konsantrasyonları patates çeşidine göre yüzlerce mg/kg düzeyine ulaşabilmektedir. Bu moleküller sadece renk veren pigmentler değil aynı zamanda antioksidan ve biyolojik olarak aktif bileşikler olarak da önem taşır (Kim vd., 2025). Mor ve diğer renkli patateslerin antosiyanin

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0001-9856-8064.

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yüksekokulu Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0001-6061-5347.

profili genotipe, yetiştirme şartlarına, tuber dokusuna (kabuk/et) ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir.

Mor ve kırmızı patateslerin fenolik içeriklerinin ve biyolojik aktivitelerinin belirlenmesinde ekstraksiyon yöntemi kritik bir değişken olup, literatürde genellikle etanol (%70–80), metanol (%50–80), asidik etanol (0.1–1% HCl) veya asidik metanol çözücülerinin kullanıldığı raporlanmıştır (Behn vd., 2023). Antosiyaninlerin ekstraksiyonu, patates fenolik bileşenlerinin analizi ve potansiyel gıda uygulamaları için kritik bir adımdır (Mane vd., 2015). Mor patates ekstraktlarında kullanılan teknikler arasında hem saflaştırma (ör. adsorpsiyon reçineleri) hem de optimize edilmiş solvent koşulları ile yüksek saflaştırma verimleri sağlanmıştır, bu da ekstraktların daha konsantre antosiyanin içeriğiyle değerlendirilmesine olanak tanır (Sampaio vd., 2021; Cebulak vd., 2022).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, mor patates ekstraktlarının antimikrobiyal aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur. Çeşitli çalışmalarda antosiyanin açısından zengin fraksiyonların *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* ve bazı fungus türlerine karşı inhibitör etki oluşturduğu bildirilmiştir (Gebrechistos vd., 2020; Sabuncu vd., 2025). Antimikrobiyal etkinin antosiyanin yoğunluğu, fenolik asit içeriği ve ekstraksiyon koşullarıyla ilişkili olabileceği vurgulanmaktadır. Mor patateslerin antimikrobiyal kapasitesi, geleneksel patates türlerine göre daha yüksek antioksidan özellik göstermeleri ile birlikte değerlendirildiğinde fonksiyonel gıda ve biyomedikal uygulamalar için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Türkiye’de yürütülen patates ıslah çalışmaları kapsamında geliştirilen “İlkmor” gibi yerel mor patates çeşitlerinin tescillenmesi (AA, 2020), hem yerli genetik kaynakların korunması hem de yüksek fenolik/antosiyanin içeriğiyle ticari değer yaratması açısından önemlidir. Ancak yerli

mor patateslerin fenolik kompozisyonu, ekstraksiyon verimi, antosiyanin stabilitesi, antimikrobiyal etkisi, pişirme/işleme koşullarına dayanıklılığı ve biyolojik aktivitelerine ilişkin veriler sınırlıdır. Bu nedenle Türkiye'ye özgü mor patates çeşitlerinin kapsamlı kimyasal karakterizasyonu, antimikrobiyal etkilerinin doğrulanması hem ulusal gıda sanayiine hem de uluslararası literatüre özgün katkılar sağlayacaktır. Sonuç olarak, mor patatesler yalnızca temel besin kaynakları değil aynı zamanda yüksek antosiyanin içeriği ve çeşitli biyolojik aktiviteleri nedeniyle fonksiyonel gıda bileşenleri olarak bilimsel değeri yükselen materyallerdir.

Bu çalışmada Türkiye' de üretilen mor patatesin (*Solanum Tuberosum* L.var. İlkmor) metanol, etanol ve su ekstraktları yapılmış, çözücüler uzaklaştırıldıktan sonra su ve %0,1 etanol solüsyonları hazırlanmıştır. Bu solüsyonların ve saf antosiyanin solüsyonunun 9 farklı gıda orijinli bakteriye karşı antibakteriyel etkisi disk difüzyon yöntemi uygulanarak tespit edilmiştir.

2. MATERYAL METOD

2.1. Materyal

Mor patates ulusal bir marketten yerli mor patates etiketiyle alınmıştır. Kullanılana kadar oda şartları altında depolanmıştır. MERCK marka besiyeri ve çözücüler kullanılmıştır.



Şekil 1. Yerli Mor Patates (*Solanum Tuberosum* L.var. İlkmor)

Bu çalışmada, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Mikrobiyoloji Laboratuvarı kültür koleksiyonunda yer alan *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus spp.*, *Escherichia coli* Tip 1, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella spp.*, *Salmonella enteritidis* ve *Cronobacter sakazakii* türlerine ait gıda kaynaklı izolatlar kullanılmıştır.

2.2. Ekstraksiyon

Elde edilen yerli mor patatesin tuber kısmı farklı çözücüler (su, MeOH:su, EtOH:su) kullanılarak ekstrakte edildi. 1:10 oranında örnek: solvent olarak hazırlanan numuneler Waring blenderda 2 dakika homojenize edildi ve ardından oda koşullarında bir saat manyetik karıştırıldı. Elde edilen karışım Whatman No. 1 kağıdı ile süzüldü ve solvent vakum altında Heidolph döner buharlaştırıcı ile uzaklaştırılıp 50 mg/mL stok olarak antibakteriyel analizler için hazırlanmıştır. Oluşturulan ekstraktlar ise ayrı ayrı saf su ve % 0,1 etanol saf su karışımında çözüldürülmüştür. Tüm ekstraktlar membran filtrasyon yöntemi (0,45 µm) ile sterilize edilmiştir ve kullanılıncaya kadar kahverengi şişelerde +4°C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir.

2.3. Toplam Antosiyaninlerin Ekstraksiyonu

Kabukları soyulmuş yerli mor patates örnekleri (yaklaşık 100 g), 1.0 N HCl ile asitlendirilmiş 250 mL metanol (85:15, v/v) ile bir Waring blenderda (Waring, Conn, ABD) 2 dakika boyunca iki kez ekstrakte edildi. Ekstrakt, Whatman No. 1 kağıdı (Whatman Inc., Clifton, N.J.) kullanılarak bir Buchner hunisinde vakum altında filtrelendi. Süzüntü, toplam antosiyaninlerin saflaştırılması için vakum altında Heidolph döner buharlaştırıcı (HEI-VAP Value G1, Schwabach, Almanya) kullanılarak 40 °C'de konsantre edildi.

2.3.1. Toplam Antosiyaninlerin Saflaştırılması

Antosiyaninler, Demir vd. (2015) metodolojisine göre saflaştırıldı. Şekerler, organik asitler, polifenolikler ve antosiyaninler vb. içeren süzüntü, Amberlite XAD-7 (Alfa Aesar Co., Karlsruhe, Almanya) reçine kolonuna yüklendi. İlk olarak, şekerleri, asitleri ve diğer suda çözünen bileşikleri uzaklaştırmak için damıtılmış su (yaklaşık 500 mL) ile yıkandı ve ardından polifenolik bileşikleri uzaklaştırmak için etil asetat (yaklaşık 300 mL) ile yıkandı. Son olarak, toplam antosiyaninler %0,1 trifloroasetik asit (v/v) içeren metanol ile geri kazanıldı. Bu asitlendirilmiş metanol fraksiyonu birleştirildi ve vakum altında kurutulana kadar buharlaştırıldı. Elde edilen ekstrakt 50 mg/mL olarak saf suda hazırlanarak mikrobiyolojik analizler için ekstrakt membran filtrasyon yöntemi (0,45 µm) ile sterilize edilmiştir ve kullanılıncaya kadar kahverengi şişelerde +4°C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir.

2.4. Antibakteriyel Etkinin Belirlenmesi

Antibakteriyel etkinin belirlenmesinde Clinical and Laboratory Standards Institute 2024 prosedürleri modifiye edilerek disk difüzyon yöntemi uygulanmıştır (CLSI, 2024). -45 °C'de muhafaza edilen stok bakteri kültürleri Tryptic Soy Broth (TSB) besi ortamında aktifleştirilmiştir. Aktifleştirilen

kültürlerden Triptic Soy Agar besisi ortamına ekilmiş ve tek koloni oluşturulmuştur. Benzer kolonilerden alınarak 4-5 ml'lik TSB'ye eklenmiş ve spektrofotometrede yoğunluğu MacFarland 0,5'e ayarlanmıştır. 100 µl inokulum Müller Hinton Agar'a (MHA) ekilmiş ve ekstrakt emdirilmiş 6 mm çaplı diskler steril koşullarda bakteri aşılınmış petrilere yerleştirilmiştir. 35°C'de 18-24 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda oluşan inhibisyon zon çapları dijital kumpasla ölçülmüştür. Pozitif kontrol için Ko-Trimoksazol antibiyotik diskleri, negatif kontrol için ise steril saf su kullanılmıştır. Üç paralelli olarak çalışılmış ve sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma olarak verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Mor patates metanol, etanol ve su ekstraktları elde edilmiş, ekstraktlar çözücüler uzaklaştıktan sonra su ve %0,1 etanol ile solüsyonları hazırlanmıştır. Bu solüsyonların ve saf antosiyanin solüsyonunun 9 farklı gıda orijinli bakteriye karşı antibakteriyel etkisi Tablo 1.' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ekstrakt ve antosiyaninlerin gıda orijinli bakterilere karşı antibakteriyel etkisi

Patojen Bakteriler	Metanol Ekstraktı		Etanol Ekstraktı		Su Ekstraktı		Antosiyanin Ekstraktı	Ko-Trimoksazol	Steril saf su
	Su	%0,1 ETOH	Su	%0,1 ETOH	Su	%0,1 ETOH			
Gram negatifler									
<i>Salmonella spp.</i>	-	9,64 ±0,38	-	-	8,38 ±0,18	-	8,59 ±0,18	25,32 ±0,52	-
<i>S. typhimurium</i>	-	-	-	-	-	-	9,30 ±0,08	24,18 ±1,01	-
<i>S. enteritidis</i>	10,71 ±0,37	12,24 ±0,58	-	-	-	-	10,68 ±0,36	25,55 ± 0,24	-
<i>E.coli O157:H7</i>	8,72 ±0,26	9,47 ±0,26	-	-	-	-	8,49 ±0,27	23,19 ±0,42	-
<i>E.coli Tip 1</i>	-	10,27 ±0,04	-	-	-	-	9,24 ±0,36	25,72 ±0,78	-
<i>C.sakazakii</i>	-	10,65 ±0,16	-	-	-	-	9,10 ±0,22	25,62 ± 0,22	-
Gram pozitifler									
<i>Bacillus spp.</i>	-	-	-	-	-	-	8,11 ±0,07	26,62 ± 1,04	-
<i>L.monocytogenes</i>	-	-	-	-	-	-	8,07 ±0,38	16,83 ± 0,93	-
<i>S. aureus</i>	10,86 ±0,25	14,17 ±0,65	-	-	-	-	-	26,65 ± 0,45	-
İnhibisyon zonu çapı ortalaması ± SS (standart sapma) (n=3) Ko-Trimoksazol: Trimetoprim 1,25 µg / sülfametoksazol 23,75 µg -: aktivite yok									

Mor patates metanol ekstraktı-su solüsyonu çalışılan gıda orijinli bakterilerden *E.coli* O157:H7, *S. enteritidis* ve *S. aureus*'a karşı sırasıyla $8,72\pm0,26$, $10,71\pm0,37$ ve $10,86\pm0,25$ mm inhibisyon zonu oluşturmuştur. Metanol ekstraktlarının %0,1 ETOH ile çözülmesiyle oluşturulan solüsyonda ise daha fazla bakteriye karşı inhibisyon mevcuttur. İnhibisyon zon çapları $9,64\pm0,38$ - $14,17\pm0,65$ mm aralığında olup *S.aureus* en hassas bakteri olarak belirlenmiştir. Gram negatif bakterilerden yalnızca *S. typhimurium*, gram pozitif bakterilerden *Bacillus spp* ve *L. monocytogenes* metanol,etanol ve su ekstraktlarının su ve %0,1 ETOH solüsyonuna karşı dirençli olan bakteriler olarak tespit edilmiştir.

Agourram ve ekibi (2013) yaptıkları çalışmada viola olarak bilinen mor patatesin pulp ve kabuğunun metanol, etanol ve aseton ekstraktlarının (20mg/ml) *L.monocytogenes*, *S.aureus*, *B. cereus* *Salmonella*, *E. coli* gibi bakterilerin içinde bulunduğu 12 farklı bakteriye karşı agar well difüzyon yöntemi kullanılarak antibakteriyel aktivitesi çalışılmış ve viola türünün pulp ve kabuk ekstraktlarının çalışılan bakterilere karşı antibakteriyel aktivitesinin olmadığı gözlenmiştir. Bu çalışmada ise Agourram ve ekibinin çalıştığı *S.aureus*, *Salmonella* (*Salmonella spp.*ve *S. enteritidis*) ve *E. coli*'ye (*E. coli* Tip 1 ve *E. coli* O157:H7) karşı inhibisyon görülmüştür.

Mor patates etanol ekstraktlarının iki solüsyonunun da çalışılan tüm bakterilere karşı inhibisyon etkisi gözlenmemiştir. Mor patates su ekstraktlarının ise %0,1 ETOH solüsyonunun hiçbir bakteriye karşı inhibisyonu gözlenmezken su solüsyonunun yalnızca *Salmonella spp.*ye karşı $8,38\pm0,18$ mm çapında inhibisyon zonu belirlenmiştir.

Bontempo ve ekibi (2013) antosiyanince zengin *Solanum tuberosum* L.var. Vitelotte'nin etanol-asit ekstraktlarının 9 farklı bakteriye karşı antibakteriyel aktivitesini çalışmış ve kullanılan

ekstrakt en fazla *S.aureus*' a karşı etki etmiştir. Bu çalışmada *S.aureus*' a karşı etanol ekstraktlarında inhibisyon görülmemiştir ancak metanol ekstraktlarında (%0,1 ETOH solüsyonu) en hassas bakteri *S.aureus* olarak belirlenmiştir.

Sampaio ve ekibi (2021) mor patates çeşitlerinin su-asit ekstraktlarının gram pozitif (*B. cereus* *S. aureus* ve *L. monocytogenes*) ve gram negatif (*E. coli*, *E. cloacae* ve *S.typhimurium*) bakterilere karşı antibakteriyel aktivitesinin olduğunu tespit etmiştir. Ancak bu çalışmada su ekstraktlarının çalışılan bakterilere karşı inhibisyon etkisi (*Salmonella spp.* hariç) neredeyse görülmemiştir. Bontempo vd. (2013) ve Sampaio vd. (2021) yaptıkları çalışmalarda ekstraktlar için farklı ana solventler (etanol ve su) kullanılsa da bu çalışmadan farklı olarak kullandıkları asit olumlu bir fark yaratmış olabilir.

Mor patatesten elde edilen saf antosiyanin ise *S. aureus* dışındaki tüm bakterilere karşı etkili olmuştur. İnhibisyon zon çapları $8,07 \pm 0,38$ ile $10,68 \pm 0,36$ mm. arasında ölçülmüştür. Mor patates antosiyanine karşı en hassas bakteri *S. enteritidis* olarak belirlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada birçoğunun et rengi mor, kırmızı ya da mavi olan antosiyanince zengin 30 tip patatesin antimikrobiyal aktivitesi incelenmiştir. Bu çalışma ile benzer olarak patates ekstraktlarının *E.coli*, *S. typhimurium* *S. aureus* *L. monocytogenes* ve *B.cereus* gibi bakterilere karşı inhibisyon etki gösterdiği belirlenmiştir (Rodrigues,2021).

Kızılcık, ahududu, yaban mersini, çilek ve siyah frenk üzümü gibi antosiyaninlerce zengin ekstraktlar antibakteriyel etki gösterirler. Çalışmalarda bu ekstraktların daha çok gram negatif bakterilere karşı etkili olduğu gram pozitif bakterileri inhibe etmediği gözlenmiştir (Côté vd., 2011; Khoo vd., 2017). Bu çalışmada da benzer şekilde çalışılan tüm gram negatif bakteriler $8,49 \pm 0,27$ ile $10,68 \pm 0,36$ mm arasında inhibisyon zonu

oluşturarak inhibe etmiş, gram pozitif bakterilerde ise ya daha düşük inhibisyon ($8,07 \pm 0,38$ ve $8,11 \pm 0,07$ mm) göstermiş ya da *S.aureus*'ta olduğu gibi inhibe etmemiştir. Bu farklılığın gram negatif ve gram pozitif bakterilerin hücre duvarları arasında farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Gram negatiflerin hücre duvarı hidrofobik bileşiklere karşı bariyer görevi görürken hidrofilik bileşiklere karşı böyle bir bariyer görevi görmez (Helander vd.,1998; Khoo vd., 2017).

Antosiyanin içeren örneklerde antosiyaninler gıda kaynaklı patojenlerin büyümesini engellemede antimikrobiyal aktiviteye sahip tek bileşen değildir, bu özelliğe sahip birçok polifenolik bileşik de antimikrobiyal mekanizmada etkilidir (Cushnie vd., 2005). Antosiyanin içeren ekstraktlarda antimikrobiyal etkinin antosiyaninlerle beraber çeşitli fitokimyasallar, fenolik asitler, zayıf organik asitler ve bu bileşiklerin farklı kimyasal formları ve sinerjik etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Cisowska vd.,2011).

4. SONUÇ

Bu çalışmada Türkiye' de üretilen mor patatesin (*Solanum Tuberosum* L.var. İlkmor) metanol, etanol ve su ekstraktları yapılmış, çözücüler uzaklaştırıldıktan sonra su ve %0,1 etanol solüsyonları hazırlanmıştır. Bu solüsyonların ve saf antosiyanin solüsyonunun 9 farklı gıda orijinli bakteriye karşı antibakteriyel etkisi disk difüzyon yöntemi uygulanarak tespit edilmiştir. Sonuçlar saf antosiyaninin *S.aureus* hariç tüm bakterilere karşı inhibisyon etkisinin olduğunu göstermiştir. Etanol ve su ekstraktları (*Salmonella spp.* hariç) çalışılan bakterilerde etkili olamamıştır. Metanol ekstraktları ise birçok bakteriye karşı inhibisyon etki gösterirken %0,1 etanol solüsyonu etkiyi arttırmıştır. Metanol ekstraktı su solüsyonu *E.coli* O157:H7, *S. enteritidis* ve *S. aureus*'a karşı etkiliyken, %0,1 etanol solüsyonu

aynı bakterilerin yanı sıra *Salmonella spp.*, *E.coli* Tip 1 ve *C.sakazakii*'ye karşı da inhibisyon etki göstermiştir. En iyi inhibisyon zon çapı metanol ekstraktı %0,1 etanol solüsyonunda ölçülmüş olup en hassas bakteri *S.aureus* olarak tespit edilmiştir.

Antibiyotik direncindeki artışın yanı sıra, antibiyotik kullanımının bağırsak mikrobiyotası üzerinde olumsuz etkilere yol açması, antibiyotiklere alternatif olarak doğal antimikrobiyal ajanlara yönelme gerekliliğini ortaya koymaktadır. Mor patates gibi antosiyanin bakımından zengin ve güçlü biyoaktif içeriğe sahip doğal kaynaklar, gıda kaynaklı bakterilerin inhibisyonunda önemli bir potansiyel sergilemekte olup, antimikrobiyal farmasötik preparatlar formunda değerlendirilerek mikrobiyal kontrol ve mücadele stratejilerinde kullanılabilir dolayısıyla mevcut antibiyotiklere alternatif yaklaşımlar geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Agourram, A., Ghirardello, D., Rantsiou, K., Zeppa, G., Belviso, S., Romane, A., & Giordano, M. (2013). Phenolic content, antioxidant potential, and antimicrobial activities of fruit and vegetable by-product extracts. *International Journal of Food Properties*, 16(5), 1092–1104. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.576446>
- Behn, A., Lizana, C., Zapata, F., Gonzalez, A., Reyes-Díaz, M., & Fuentes, D. (2023). Phenolic and anthocyanin content characterization related to genetic diversity analysis of *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum* Chilotanum Group in southern Chile. *Frontiers in plant science*, 13, 1045894.
- Bontempo, P., Carafa, V., Grassi, R., Basile, A., Tenore, G. C., Formisano, C., Rigano, D., Altucci, L., & Menichini, F. (2013). Antioxidant, antimicrobial and anti-proliferative activities of *Solanum tuberosum* L. var. Vitelotte. *Food and Chemical Toxicology*, 55, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.01.016>
- Cebulak, T., Krochmal-Marczak, B., Stryjecka, M., Krzysztofik, B., Sawicka, B., Danilčenko, H., & Jarienè, E. (2022). Phenolic acid content and antioxidant properties of edible potato (*Solanum tuberosum* L.) with various tuber flesh colours. *Foods*, 12(1), 100.
- Cisowska, A., Wojnicz, D., & Hendrich, A. B. (2011). Anthocyanins as antimicrobial agents of natural plant origin. *Natural Product Communications*, 6(1), 149–156.
- Clinical and Laboratory Standards Institute. (2024). *Performance standards for antimicrobial disk susceptibility tests* (14th ed., CLSI Standard M02). CLSI.

- Cote, J., Caillet, S., Doyon, G., Sylvain, J. F., & Lacroix, M. (2011). Antimicrobial effect of cranberry juice and extracts. *Food Control*, 22(8), 1413–1418. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.02.024>
- Cushnie, T. P. T., & Lamb, A. J. (2005). Antimicrobial activity of flavonoids. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 26(5), 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2005.09.002>
- Demir, T., Gunesli, Z., Sonmez, F., Bilen, C., Yavuz, E., & Gencer, N. (2015). Inhibition of carbonic anhydrase I and II with total anthocyanins extracted from sweet cherry cultivars. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 14(4).
- Gebrechistos, H. Y., Ma, X., Xiao, F., He, Y., Zheng, S., Oyungerel, G., & Chen, W. (2020). Potato peel extracts as an antimicrobial and potential antioxidant in active edible film. *Food science & nutrition*, 8(12), 6338-6345.
- Helander, I. M., Alakomi, H. L., Latva-Kala, K., Mattila-Sandholm, T., Pol, I., Smid, E. J., Gorris, L. G. M., & von Wright, A. (1998). Characterization of the action of selected essential oil components on Gram-negative bacteria. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(9), 3590–3595. <https://doi.org/10.1021/jf980154m>
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., & Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, 61(1), 1361779. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Kim, I. V., Nawaz, M. A., Volkov, D. I., Klykov, A. G., Razgonova, M. P., & Golokhvast, K. S. (2025). Identification and Quantification of Anthocyanins in

Various Organs of Potato Varieties (*Solanum tuberosum* L.) as Potential Visual Selection Markers During Breeding. *Plants*, 14(13), 2042.

Mane, S., Bremner, D. H., Tziboula-Clarke, A., & Lemos, M. A. (2015). Effect of ultrasound on the extraction of total anthocyanins from Purple Majesty potato. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 509-514.

Rodrigues, C. T. (2021). *Chemical, physical and bioactive properties of different cultivars of potatoes (Solanum tuberosum L.) and their peels* (Master's thesis). Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.

Sabuncu, M., Dulger Altiner, D., & Sahan, Y. (2025). In vitro biological activity and nutritional evaluation of purple potato (*Solanum tuberosum* L. var. Vitelotte). *BMC chemistry*, 19(1), 116.

Sampaio, S. L., Lonchamp, J., Dias, M. I., Liddle, C., Petropoulos, S. A., Glamočlija, J., ... & Barros, L. (2021). Anthocyanin-rich extracts from purple and red potatoes as natural colourants: Bioactive properties, application in a soft drink formulation and sensory analysis. *Food Chemistry*, 342, 128526.

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT INTENSITY ON COLOUR CHANGE IN LACTOSE-FREE MILK PRODUCTION: THE CONTRIBUTION OF GLUCOSE AND GALACTOSE TO THE MAILLARD REACTION

Ashhan TŮĞEN¹

1. INTRODUCTION

Today, the prevalence of lactose intolerance cases on a global scale and transformations in consumer awareness create a remarkable market dynamism in the dairy industry. The surge in demand, particularly for lactose-free dairy products, is fuelled not only by a medical necessity but also by psychological factors, such as consumers identifying as lactose intolerant and perceiving these products as healthier options (Castellini & Graffigna, 2022). It is known that most of the population worldwide loses the ability to digest lactose after infancy, making the lactose-free product segment the fastest growing market in the dairy industry (Dekker et al., 2019). However, this growth is not limited to increasing product diversity but also necessitates fundamental changes in manufacturing technologies and quality standards. Consumers demand the sensory attributes of traditional milk, particularly its taste and colour, when turning to lactose-free products. At this point, manufacturers must precisely manage the effects of the enzymatic processes they use to break down lactose and the heat treatments they apply for safety on the final quality of the product (Schulz & Rizvi, 2021). Consumers' trust or distrust in industrial

¹ (PhD Student), Afyon Kocatepe University Institute of Sciences, Department of Food Engineering, Afyonkarahisar, Türkiye, ORCID: 0000-0001-5344-2804

processing techniques also plays a decisive role in shaping the market (Andreatta et al., 2019). Thus, the lactose-free milk market is being restructured at the intersection of health requirements, consumer perception, and advanced food processing technologies.

The lactose hydrolysis, which is central to lactose-free milk production, fundamentally alters the chemical structure of milk, which predisposes to undesirable colour changes during heat treatment. Lactose, a disaccharide naturally found in milk, is broken down into its building blocks, glucose and galactose monosaccharides, through the enzyme lactase (Li et al., 2023). This enzymatic conversion not only increases the sweetness of milk but also creates a more reactive environment against heat at the molecular level. Monosaccharides have simpler molecular structures compared to disaccharides, significantly increasing their tendency to undergo a Maillard reaction during heat treatment (Dekker et al., 2019). The Maillard reaction causes the formation of browning pigments (melanoidins) because of the reaction of reducing sugars with amino acids. Glucose and galactose, which are present in free form in lactose-free milk, exhibit stronger reducing properties than lactose, leading to the milk browning even at lower temperatures or for shorter periods of time during heat treatment. This chemical predisposition makes colour preservation during pasteurization and UHT processes, which are applied to extend the shelf life of milk or ensure its safety, a technically challenging process (Morales & Jiménez-Pérez, 1999).

The "whiteness" of milk is accepted as a basic quality criterion identified with freshness, purity and naturalness in the minds of consumers. Any yellowing or browning of the milk's colour in consumer perception is interpreted as the product being spoiled, over-processed, or losing its nutritional value (Castellini & Graffigna, 2022). This perception stems from the association

of "whiteness" with perfection in the historical and cultural codes of milk, and colour deviations due to heat treatment therefore directly threaten the perception of quality. Especially in lactose-free milks, the acceleration of the Maillard reaction due to the reactive nature of the above-mentioned monosaccharides causes the colour of these products to change more quickly than in conventional milks (Li et al., 2023). Kinetic studies have revealed that colour change (ΔE) and yellowness index (YI) increase linearly with the severity of the heat treatment applied, and changes above a certain threshold value ($\Delta E > 3.8$) can be noticed by consumers with the naked eye (Pagliarini et al., 1990). This requires producers to optimize the heat treatment parameters (temperature and time) much more precisely to ensure the microbiological safety of milk while maintaining its visual quality. Otherwise, even if its nutritional value is preserved, a discoloured product risks being rejected by the consumer.

Monosaccharides are more sensitive to heat treatment than disaccharides, due to their bulk structure and kinetics of reactions. In lactose, which is a disaccharide, glucose and galactose molecules are linked together by glycosidic bonding, and this structure partially limits the release of reactive carbonyl groups. However, glucose and galactose monosaccharides released after the hydrolysis process contain more reactive carbonyl groups in their open-chain forms (Li et al., 2023). These free carbonyl groups interact much more quickly and easily with the amine groups of amino acids such as lysine in milk proteins. When heat energy is introduced into the system, this interaction (the Maillard reaction) accelerates and triggers the formation of intermediates such as hydroxymethylfurfural (HMF) (Morales & Jiménez-Pérez, 1999). The formation of HMF and the subsequent polymerization reactions form pigments that cause the colour of milk to change from yellow to brown. Although the presence of other components, such as milk fat, influences HMF formation to

a certain extent, the main determining factor is the type and concentration of reducing sugars in the medium (Morales & Jiménez-Pérez, 1999). Thus, the high concentration of monosaccharides in lactose-free milk production makes the product more vulnerable to heat damage, which makes it difficult to maintain the perception of "whiteness".

The dairy industry is resorting to advanced analysis methods and new processing technologies to overcome these challenges and meet consumer expectations. Non-destructive analysis methods, such as fluorescence and infrared spectroscopy, are employed to monitor and optimize the impact of heat treatment on milk components (Aït-Kaddour et al., 2021). These technologies can detect protein denaturation and the occurrence of Maillard products at near real-time speed, allowing for precise control of production processes. Furthermore, innovative methods such as ultra-short-term processing techniques aim to maintain the nutritional value and sensory attributes of milk equivalent to pasteurized milk while ensuring its safety (Wang et al., 2024). Biocentric biases and media framing lactose intolerance as a "deficiency" or "disease" is another sociological dimension influencing market dynamics (Kaufman & Tan, 2022). In conclusion, the lactose-free milk market follows a multidimensional development process in which biochemical challenges are overcome through technological innovations and consumer perception is managed by scientific data.

2. CONVERSION OF MILK SUGAR

Hydrolysis of lactose, the main carbohydrate of milk, with the enzyme β -galactosidase fundamentally changes the colligative properties of milk by breaking down the disaccharide structure and converting it into glucose and galactose monosaccharides. In this process, the increase in solute

concentration at the molar level causes the osmotic pressure to increase and the freezing point to decrease (Abbasi & Saeedabadian, 2015; Li et al., 2023). These theoretically expected physical changes do not always coincide exactly with stoichiometric ratios due to the presence of oligosaccharides formed by Transgalactosylation reactions during hydrolysis (Jeon & Saunders, 1986). The molecular breakdown process also creates a distinct differentiation in the sensory profile of milk, and the resulting monosaccharides have a higher sweetness index compared to lactose, increasing the sweetness perception of the product without the need for added sugar use (Shen et al., 2019). Therefore, while the hydrolysis process rearranges the physical phase balances of milk, it also directly affects the technological processability parameters.

Although the total carbohydrate balance is maintained in terms of mass, the resulting structural reactivity differences after hydrolysis significantly transform the thermal and chemical stability of milk. Since the released glucose and galactose molecules carry more active reducing groups compared to lactose, they have an increased tendency to undergo a Maillard reaction with proteins during heat treatment, accelerating the formation of components like hydroxymethylfurfural (HMF) (Tao et al., 2024). Depending on the source of the enzyme used, temporary or permanent oligosaccharides may be formed in the reaction medium, especially *enzymes originating from Bacillus circulans* exhibit less by-product profiles than other sources (Mozaffar et al., 1985). Furthermore, galactose deposited during the reaction process can exert an inhibitory effect on the enzyme, limiting its conversion efficiency, making it necessary to use advanced separation techniques such as selective crystallization in industrial processes (Bourne et al., 1983). In conclusion, although the carbohydrate mass remains constant in the production of lactose-free milk, the change in the molecular

structure plays a decisive role in the shelf life, colour and nutritional bioavailability of the product.

3. CHEMISTRY OF THE MAILLARD REACTION

The first contact between the ϵ -amino groups of lysine residues in milk proteins and the carbonyl groups of reducing sugars initiates the early phase of the Maillard reaction. At this stage, nucleophilic amine nitrogen attacks the carbonyl carbon and first carbinolamine intermediates and then the Schiff base is formed by dehydration. It has been shown that Schiff base formation in hexoses proceeds through two carbinolamine steps and one dehydration step, with dehydration being the rate-limiting step due to the higher activation barrier for all hexoses (Kato et al., 2024). This molecular framework explains why lysine-targeted glycation in milk generates rapid amino group loss early on. Because Schiff base is relatively unstable, it converts to a more stable ketoamine structure, yielding Amadori products. Amadori products are considered as central intermediates that pave the way for the formation of coloured polymers and reactive dicarbonyl intermediates in advanced stages, rather than being dark pigments directly (Yaylayan & Huyghues-Despointes, 1994).

The Maillard dynamics of lactose in dairy systems are closely linked to the limitations that its disaccharide structure poses on the "reducing power". Since only one anomeric carbon in lactose is open to reduction, the transition to free carbonyl forms is considered to be more limited compared to the monosaccharides glucose and galactose. This structural feature can slow down the progression of early-stage adducts formed by lactose with proteins and may contribute to the suppression of browning in some conditions (Kato et al., 1989). On the other hand, even at moderate temperatures, lactose can make a

significant contribution to the formation of α -dicarbonyls through Amadori derivatives in the presence of appropriate amines. In model studies examining milk-related carbohydrates under 40–50 °C conditions, it has been reported that monosaccharides significantly increase C6 α -dicarbonyls in the presence of N α -acetyl-L-lysine and galactose stands out in the formation of 3-deoxygalactosone, glyoxal and methylglyoxal (Zhang et al., 2019). These findings point out that the difference in "reducing power" drives not only the initial velocities but also the composition of the dicarbonyl pool.

In the forward transport of early-stage products in lactose-lysine systems, the breakdown and rearrangement of Amadori products play a critical role. In studies in which lactose and caseinate were considered together under dry heating conditions, it was shown that lactose consumption reached its maximum at medium relative humidity with the formation of lactulosyl-lysine, and that the degradation of Amadori product accelerated at higher relative humidity, contributing to visible browning (Pan & Melton, 2007). This observation suggests that the colour change in milk depends not only on the accumulation of Schiff base or Amadori but also on the rate of degradation of these intermediates. The identification of α -dicarbonyls derived from lactose-derived Amadori compounds, particularly the association of the formation of 1-deoxylactosone and associated derivatives with an Amadori-derived pathway, reinforces the chemical indicators of lactose-based Maillard traces in dairy products (Nomi et al., 2024). These α -dicarbonyls are able to undergo further condensations with amino acids, forming both flavor-active low molecular weight products and precursors to high molecular weight brown polymers. The observation that melanoidin formation progresses faster in model systems where the N α group is blocked suggests that the accessibility of lysine functional groups directs the reaction flow (Monti et al., 2000).

Melanoidins formed in the advanced stages of the Maillard reaction significantly alter the CIELAB parameters that measure the visual quality of milk. The general tendency is that the L* value decreases as browning increases, and this causes the product to be perceived as darker. In the same period, the a* value shows an upward trend, indicating a shift towards red. It is thought that the b* value may increase with the increase of jaundice in the initial stages and exhibit a more complex behavior with advanced polymerization and intense pigmentation. It has been highlighted that despite the relatively low reduction capacity of lactose's disaccharide structure, the accumulation of melanoidin becomes evident during prolonged or severe thermal processes, leading to undesirable colour aberration in terms of consumer perception (Nomi et al., 2024). In this context, Schiff base and Amadori products initiate and advance browning by creating a chemical platform for α -dicarbonyl formation and multi-step polymerization reactions, rather than directly dyeing the colour change of milk.

4. CONTRIBUTION OF GLUCOSE AND GALACTOSE TO THERMAL SENSITIVITY AND HEAT TREATMENT SEVERITY

Glucose and galactose released because of enzymatic hydrolysis of lactose cause the release of reactive carbonyl groups, significantly increasing the susceptibility to the Maillard reaction (Singh et al., 2021). Recent studies in the literature have revealed that hydrolyzed milk undergoes much more intense chemical changes during heat treatment and storage compared to normal milk (Jansson et al., 2014). Especially in lactose-free UHT milks, 5-hydroxymethylfurfural (HMF) levels, which are considered as a thermal damage indicator, were found to be significantly higher than normal milks (Neves & Oliveira, 2020).

This indicates that monosaccharides react with a lower energy barrier compared to lactose and accelerate reaction kinetics. In a comprehensive analysis conducted by Zhang, Poojary, and Rauh (2019), it was reported that the accumulation of α -dicarbonyl compounds such as 3-deoxyglucosone (3-DG) and 3-deoxygalactosone (3-DGal) in lactose-hydrolyzed milk was 20 to 44 times higher than in conventional milk, depending on the storage temperature. Such high increase rates suggest that the effect of the increase in the amount of free reactive sugar in the environment on the colour change and the formation of reaction products is not linear but has a cumulative character that increases reactivity severely.

On the other hand, the fact that larger-molecule structures such as galacto-oligosaccharides (GOS) participate less in the Maillard reaction than monosaccharides support the thesis that lactose's molecular size and steric structure function as a protective factor that slows down the reaction in normal milk (Zhang, Ray, et al., 2019). In addition, the free amino acids increased as a result of the residual proteolytic activity of the lactase enzyme used during the hydrolysis process stand out as another critical parameter that promotes the reactions that lead to colour change (Jansson et al., 2014). As a result, the high reactivity of galactose and glucose in hydrolyzed milks dramatically accelerates the formation of advanced glycation end products (AGEs), especially at high storage temperatures (Zhang, Poojary, & Rauh, 2020).

The low-temperature-long duration (LTLT) and high-temperature-short duration (HTST/UHT) heat treatment protocols applied in the production of lactose-free milks exhibit different colour stability profiles than normal milks due to the high reactivity of glucose and galactose released as a result of hydrolysis. In kinetic studies conducted by Pagliarini, Vernile and Peri (1990), it was determined that the colour change (ΔE) and

Yellowness Index (YI) due to heat treatment in milk obeyed the Zero-order kinetics and the activation energy was in the range of 101.8 to 117.5 KJ/mol. However, in lactose-hydrolyzed milk, the high reducing power of free monosaccharides in the environment reduces the initial temperature of the Maillard reaction and increases the reaction rate. Jansson et al. (2014) reported that lactose-free UHT milks are much more prone to chemical changes during storage and processing than conventional milks, which negatively affects colour stability. As the intensity of heat treatment increases, especially under UHT conditions, the presence of galactose and glucose accelerates the formation of melanoidins by interacting more rapidly with free amino groups. In this context, while the colour change during the LTLT process is more limited, the increase in the amount of free amino acids with the contribution of proteolytic activity due to enzymatic hydrolysis in the UHT process and subsequent storage process exacerbates browning reactions.

The F_0 value, which is used as a standard in calculating the thermal load, or the evaluation of chemical markers such as HMF (Hydroxymethylfurfural) and furosine for lactose-free milks requires a different approach than the reference ranges determined for normal milks. Morales, Romero and Jiménez-Pérez (2000) stated that a single indicator is not sufficient for the assessment of thermal damage, HMF is suitable for low thermal processes and lactulose is suitable for more severe processes. However, the situation differs in lactose-free milk. Jansson et al. (2014) found that the rate of furosine formation in lactose hydrolyzed milk was approximately 2.5 times higher than in normal milk. This causes a heat treatment that is considered acceptable for normal milk to quickly reach the limits of "extreme heat treatment" in terms of chemical markers in lactose-free milk. Furthermore, Zhang, Poojary, & Rauh (2019) revealed that the concentrations of advanced glycation end products (AGEs) such

as N- ϵ -carboxymethyllysine (CML) and N- ϵ -carboxyethyllysine (CEL) were markedly higher in lactose-free UHT milks compared to regular milks. Therefore, it is imperative to recalibrate the chemical marker standards used in the quality control of lactose-free milks taking into account the increasing reactivity.

At temperatures of 135°C and above, which is the critical temperature threshold, the thermal degradation (caramelization) of sugars begins to play a dominant role in the colour change mechanism in addition to the Maillard reaction. In the study conducted by Zhang, Poojary, and Rauh (2019), it was observed that the accumulation of α -dicarbonyl compounds such as 3-deoxyglucosone (3-DG) and 3-deoxygalactosone (3-DGal) was 20 to 44 times higher in lactose-free UHT milks compared to regular milks. This high increase shows that glucose and galactose can be broken down independently of amino groups under the influence of temperature and contribute to the formation of colour pigments by converting into reactive intermediates. In particular, the faster degradation of galactose at high temperatures triggers polymerization reactions by increasing the reactive carbonyl charge in the environment. These α -dicarbonyl compounds formed during heat treatment both create new precursors for the progression of the Maillard reaction and cause darkening of milk colour directly through caramelization-like reactions. As a result, the deterioration of the stability of monosaccharides at high temperatures transforms the formation kinetics of pigments that cause colour change into a much more aggressive accumulation process rather than a linear increase.

5. KINETIC MODELING OF COLOUR CHANGE

The colour changes and yellowing reaction caused by heat treatment in normal milk are generally explained by the zero-order kinetic model (Pagliarini, Vernile, & Peri, 1990). Changes

in the amount of hydroxymethylfurfural (HMF), which occurs during these reactions and are an indicator of thermal damage, similarly conform to zero-order kinetics when the concentration changes are small (Kessler & Fink, 1986). Barbanti, Mastrocola and Lerici (1990) stated that non-enzymatic browning reactions can be evaluated through a zero-degree kinetic model in their studies on model systems containing glucose and glycine that simulate lactose-free milk environment. However, the hydrolysis process in lactose-free milk causes the release of reactive sugars (glucose and galactose) in the environment, fundamentally changing the reaction rate. Jansson et al. (2014) reported that chemical changes in lactose-hydrolyzed milk occur much faster than in conventional UHT milk, leading to significant yellowing during storage.

The activated energy values calculated for the colour change of normal milk were determined at the level of approximately 101.8 kJ/mol for the colour difference (ΔE) and 117.5 kJ/mol for the Yellowness Index (YI) using the Arrhenius equation (Pagliarini et al., 1990). In lactose-free milk systems, on the other hand, the activation energy barrier appears to be functionally differentiated due to the higher reactivity of monosaccharides compared to lactose. Neves and Oliveira (2020) found that HMF levels in lactose-free UHT milks were more than three times higher than in normal milk (42.15 $\mu\text{mol/L}$ vs. 13.11 $\mu\text{mol/L}$). These data suggest that the thermodynamic barrier of the Maillard reaction in lactose-free milk is more easily overcome and that the susceptibility to chemical changes increases with the presence of reactive species. In addition, when the activation energy of 109 kJ/mol determined by Kessler and Fink (1986) for lysine loss is evaluated together with the increased free amino acid presence as a result of proteolytic activity in lactose-free milk, it indicates that thermal sensitivity has become a more critical parameter than normal milk.

The presence of reducing sugars such as glucose and galactose directly affects the value of Q_{10} , which refers to the reaction rate change due to temperature increase, and the overall reaction kinetics. Singh, Rao, & Sharma (2021) have highlighted that the increased monosaccharide content in lactose-hydrolyzed dairy products is the key factor accelerating Maillard browning. The rate of furosine formation in lactose-free milk was found to be approximately 2.5 times higher than in normal milk, proving that the reaction rate increased more sharply with the increase in temperature than in normal milk (Jansson et al., 2014). Although Giménez et al. (2015) stated that colour changes in foods are compatible with the Arrhenius relationship of temperature dependence, the free reactive groups in hydrolyzed milks change this relationship in the direction of acceleration. This increased reactivity in lactose-free products paves the way for the reaction rate to be more severe than normal milk with each increase in temperature. As a result, the chemical stability of hydrolyzed milks is noticeably lower than that of regular milk under storage and heat treatment conditions.

6. STORAGE PROCESS AND POST-PROCESS BROWNING

Early-stage Maillard reaction products, which start during heat treatment but are not yet visually perceptible, constitute the basic chemical infrastructure for the continued yellowing of milk during the storage process. Rauh et al. (2015) determined that heat treatment applied on the production line initiates protein lactosylation, which proceeds accumulatively throughout storage, especially at ambient temperature, leading to the formation of indicators such as furosine. The molecular interactions that occur between casein and whey proteins during milk processing increase in direct proportion to the storage time (Liu et al., 2019).

Knudsen et al. (2024) reported that pre-hydrolyzed lactose-free milks exhibited more intense browning during storage compared to those that were subsequently hydrolyzed. This proves that precursor compounds such as acetic acid and furfural, which are formed during production, initiate the reaction chain that triggers the visual colour change even before the packaging stage. Thus, the thermal history and hydrolysis timing on the production line directly determine the colour stability observed throughout the shelf life.

The interaction of glucose and protein in lactose-free UHT milk has a much more critical degradation potential than normal milk, as monosaccharides have higher reactivity compared to lactose. Neves and Oliveira (2020) found that lactose-free milk samples reached significantly higher levels of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) during heat treatment and storage compared to regular milk. Jansson et al. (2014) revealed that the amount of free amino acids increased in hydrolyzed milk, which accelerated chemical changes by expanding the pool of substrates undergoing the Maillard reaction. Zhang, Poojary, & Rauh (2020) emphasized that the formation of lysine and arginine-derived advanced glycation end products (AGEs) is more dominant in lactose-free milks than in normal milks, and this is due to the presence of galactose and glucose. The faster reaction of the reducing ends of these monosaccharides with free amino groups in proteins makes lactose-free milks more vulnerable to thermal damage and oxidative degradation.

The increase in ambient temperature affects the reaction kinetics in lactose-free milk more severely than in normal milk and accelerates quality losses throughout shelf life. Holland, Gupta, and Deeth (2011) have shown that storage temperatures above 20°C increase molecular modifications in proteins, such as crosslinking, deamidation, and lactosylation. Aguilera-Toro et al. (2022) reported that sediment formation in UHT milk is directly

related to temperature-dependent increased late-stage Maillard reaction products (CEL and CML). Popov-Raljić et al. (2008) noted that storage time and temperature caused statistically significant changes in the colour parameters of milk, especially in the Yellowness Index. The high reactivity in hydrolyzed milk, combined with the increase in temperature, causes the glucose-protein interaction to cross the activation energy barrier more easily and the yellowing reaction to follow a more aggressive course than normal milk.

7. CONCLUSION

The biochemical and kinetic findings evaluated within the framework of this study indicate that the main determinant of colour aberration due to heat treatment in lactose-free milk is increased glucose and galactose reactivity after hydrolysis. Therefore, the critical goal in lactose-free milk technology is to move to a process design that will keep the Maillard-induced “loss of whiteness” below the threshold of consumer perception while maintaining microbiological safety. The quality control approach should be based on chemical and colourimetric targets specific to lactose-free products, not on the “normal milk reference”, as the thermal load levels considered acceptable for conventional milk can lead to faster accumulation of HMF/furosine/ α -dicarbonyl in the lactose-free matrix. In this context, the success of the process should be evaluated not only by colour measurement at the time of exit, but by controlling the ΔE upward trend throughout storage.

The first principle in the revision of heat treatment norms is to reduce the contact time of monosaccharides with high temperature. For this purpose, two strategies stand out on an industrial scale. The first is aseptic enzyme applications, which shift hydrolysis after heat treatment. The addition of lactase under

sterile conditions after UHT or similar sterilization step has the potential to reduce the initial Maillard load by minimizing the time glucose and galactose are present at high temperatures. The second is that if pre-hydrolysis is mandatory, the heat treatment intensity should be re-optimized on the axis of "higher temperature-shorter time". From a kinetic point of view, it is theoretically possible to limit the accumulation of intermediates to colour formation to the extent that the total reaction time is reduced, while maintaining the equivalent microbial inactivation target. Therefore, the optimum norm for lactose-free milks should be designed as a "process window" defined together with the hydrolysis timing of the product, the initial free amino acid level and the target shelf life, rather than a single constant temperature/time combination. This window should be supplemented by a safe upper bound, where ΔE does not approach the consumer-distinguishable threshold.

In terms of pre-process measures, interventions to reduce Maillard speed should be handled with a multivariate control logic. Firstly, pH management is a meaningful lever; Since the Maillard reaction accelerates at higher pH levels in general, a limited pH optimization without impairing sensory acceptance can reduce the tendency to yellow. Second, the application of rapid cooling during and immediately after hydrolysis can reduce the pool of reactive intermediates transferred to heat treatment by suppressing the early-stage kinetics of the reaction. Third, oxygen management and control of metal catalysis (reduction of oxygen in raw milk, appropriate packaging barriers, process conditions that limit oxidative side reactions) can contribute to reducing the rate of "after-yellowing" during the storage period. Fourthly, enzyme selection and purity is a critical quality parameter; Opting for enzyme preparations that exhibit a low byproduct profile and minimal undesirable proteolytic activity helps maintain

hydrolysis efficiency without unnecessarily enlarging the free amino acid pool.

In line with these findings, the "heat treatment + hydrolysis" duo in lactose-free milk production should be considered as a single integrated quality design problem. The most rational approach is to define chemical marker limits and colourimetric targets specific to lactose-free products, with process streams that decouple the timing of hydrolysis from high-temperature exposure. Thus, without compromising microbiological safety, the preservation of whiteness, which is the main quality mark for the consumer, throughout the shelf life will become more predictable and manageable.

BIBLIOGRAPHY

- Abbasi, S., & Saeedabadian, A. (2015). Influences of lactose hydrolysis of milk and sugar reduction on some physical properties of ice cream. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 367-374.
- Aguilera-Toro, M., Poulsen, N. A., Akkerman, M., Rauh, V., Larsen, L. B., & Nielsen, S. D. H. (2022). Development in Maillard reaction and dehydroalanine pathway markers during storage of UHT milk representing differences in casein micelle size and sedimentation. *Foods*, 11(10), 1525.
- Aït-Kaddour, A., Hassoun, A., Bord, C., Schmidt-Filgueras, R., Biancolillo, A., Di Donato, F., ... & Cozzolino, D. (2021). Application of spectroscopic techniques to evaluate heat treatments in milk and dairy products: An overview of the last decade. *Food and Bioprocess Technology*, 14(5), 781-803.
- Andreatta, T., Costa, N. L., Freire Dos Santos, I., & Binello, L. (2019). A operação “leite compensado” e as percepções dos consumidores de leite no município de panambi/rs. *Nucleus* (16786602), 16(1).
- Barbanti, D., Mastrocola, D., & Lerici, C. R. (1990). Early indicators of chemical changes in foods due to enzymtic or non enzymic browning reactions. II, Colour changes in heat treated model systems. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie*, 23(6), 494-498.
- Bourne, J. R., Hegglin, M., & Prenosil, J. E. (1983). Solubility and selective crystallization of lactose from solutions of its hydrolysis products glucose and galactose. *Biotechnology and bioengineering*, 25(6), 1625-1639.

- Castellini, G., & Graffigna, G. (2022). Evolution of milk consumption and its psychological determinants: a Mini-review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 845154.
- Dekker, P. J., Koenders, D., & Bruins, M. J. (2019). Lactose-free dairy products: Market developments, production, nutrition and health benefits. *Nutrients*, 11(3), 551.
- Giménez, P. J., Fernández-López, J. A., Angosto, J. M., & Obón, J. M. (2015). Comparative thermal degradation patterns of natural yellow colourants used in foods. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(4), 380-387.
- Holland, J. W., Gupta, R., Deeth, H. C., & Alewood, P. F. (2011). Proteomic analysis of temperature-dependent changes in stored UHT milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(5), 1837-1846.
- Jansson, T., Clausen, M. R., Sundekilde, U. K., Eggert, N., Nyegaard, S., Larsen, L. B., ... & Bertram, H. C. (2014). Lactose-hydrolyzed milk is more prone to chemical changes during storage than conventional ultra-high-temperature (UHT) milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(31), 7886-7896.
- Jansson, T., Jensen, H. B., Sundekilde, U. K., Clausen, M. R., Eggert, N., Larsen, L. B., ... & Bertram, H. C. (2014). Chemical and proteolysis-derived changes during long-term storage of lactose-hydrolyzed ultrahigh-temperature (UHT) milk. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(46), 11270-11278.
- Jeon, I. J., & Saunders, S. R. (1986). Effect of oligosaccharide formation on the cryoscopic measurements of enzymatic hydrolysis of lactose in dairy products. *Journal of Food Science*, 51(1), 245-246.

- Kato, K., Nakayoshi, T., Shinohara, Y., Kurimoto, E., Oda, A., & Ishikawa, Y. (2024). Theoretical Studies on the Reaction Mechanism of Schiff Base Formation from Hexoses. *The Journal of Physical Chemistry B*, 128(20), 4952-4958.
- Kato, Y., Matsuda, T., Kato, N., & Nakamura, R. (1989). Maillard reaction of disaccharides with protein: suppressive effect of nonreducing end pyranoside groups on browning and protein polymerization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 37(4), 1077-1081.
- Kaufman, E. J., & Tan, C. (2022). White as milk: Biocentric bias in the framing of lactose intolerance and lactase persistence. *Sociology of Health & Illness*, 44(9), 1533-1550.
- Kessler, H. G., & Fink, R. (1986). Changes in heated and stored milk with an interpretation by reaction kinetics. *Journal of Food Science*, 51(5), 1105-1111.
- Knudsen, L. J., Lokerse, I., Pedrotti, M., Nielsen, S. D. H., Dekker, P., Rauh, V., ... & Larsen, L. B. (2024). Differences in development of volatiles and bitter peptides between pre-and post-hydrolysed lactose-free UHT milk during storage. *International Dairy Journal*, 157, 106029.
- Li, A., Zheng, J., Han, X., Yang, S., Cheng, S., Zhao, J., ... & Lu, Y. (2023). Advances in low-lactose/lactose-free dairy products and their production. *Foods*, 12(13), 2553.
- Liu, H., Grosvenor, A. J., Li, X., Wang, X. L., Ma, Y., Clerens, S., ... & Day, L. (2019). Changes in milk protein interactions and associated molecular modification resulting from thermal treatments and storage. *Journal of Food Science*, 84(7), 1737-1745.
- Monti, S. M., Borrelli, R. C., Ritieni, A., & Fogliano, V. (2000). A Comparison of Colour Formation and Maillard

Reaction Products of a Lactose– Lysine and Lactose– N α -Acetyllysine Model System. *Journal of agricultural and food chemistry*, 48(4), 1041-1046.

Morales, F. J., & Jiménez-Pérez, S. (1999). HMF formation during heat-treatment of milk-type products as related to milkfat content. *Journal of Food Science*.

Morales, F. J., Romero, C., & Jimenez-Perez, S. (1996). Evaluation of heat-induced changes in Spanish commercial milk: hydroxymethylfurfural and available lysine content. *International journal of food science & technology*, 31(5), 411-418.

Morales, F. J., Romero, C., & Jiménez-Pérez, S. (2000). Characterization of industrial processed milk by analysis of heat-induced changes. *International Journal of Food Science and Technology*, 35(2), 193-200.

Mozaffar, Z., Nakanishi, K., & Matsuno, R. (1985). Formation of oligosaccharides during hydrolysis of lactose in milk using β -galactosidase from *Bacillus circulans*. *Journal of Food Science*, 50(6), 1602-1606.

Neves, L. N. D. O., & de Oliveira, M. A. L. (2020). Effects of enzymatic lactose hydrolysis on thermal markers in lactose-free UHT milk. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3518-3524.

Nomi, Y., Anazawa, T., Shinzawa, K., Tamura, M., & Matsumoto, H. (2024). Identification of lactose-derived α -dicarbonyl compounds in dairy products and elucidation of their formation mechanism. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(1), 781-789.

Pagharını, E., Vernile, M., & Peri, C. (1990). Kinetic study on colour changes in milk due to heat. *Journal of food science*, 55(6), 1766-1767.

- Ge Pan, G., & Melton, L. D. (2007). Nonenzymatic browning of lactose and caseinate during dry heating at different relative humidities. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(24), 10036-10042.
- Popov-Raljić, J. V., Lakić, N. S., Laličić-Petronijević, J. G., Barać, M. B., & Sikimić, V. M. (2008). Colour changes of UHT milk during storage. *Sensors*, 8(9), 5961-5974.
- Rauh, V. M., Johansen, L. B., Bakman, M., Ipsen, R., Paulsson, M., Larsen, L. B., & Hammershøj, M. (2015). Protein lactosylation in UHT milk during storage measured by liquid chromatography–mass spectrometry and quantification of furosine. *International Journal of Dairy Technology*, 68(4), 486-494.
- Sail, H. V., Jagdale, A. D., Thakur, M. R., & Tupe, R. S. (2024). Structural and functional characterisation of Maillard reaction products from casein-acid hydrolysate-sugars model system using multi-spectroscopic approach. *International Dairy Journal*, 149, 105838.
- Schulz, P., & Rizvi, S. S. (2023). Hydrolysis of lactose in milk: Current status and future products. *Food Reviews International*, 39(5), 2875-2894.
- Shen, J., Chen, J., Jensen, P. R., & Solem, C. (2019). Sweet as sugar—Efficient conversion of lactose into sweet sugars using a novel whole-cell catalyst. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(22), 6257-6262.
- Singh, P., Rao, P. S., Sharma, V., & Arora, S. (2021). Physico-chemical aspects of lactose hydrolysed milk system along with detection and mitigation of maillard reaction products. *Trends in Food Science & Technology*, 107, 57-67.

- Tao, H., Li, S. Q., Fang, M. J., Cai, W. H., Zhang, S., & Wang, H. L. (2024). The characterization of a low-calorie and lactose-free brown fermented milk by the hydrolysis of different enzymatic lactose. *Foods*, 13(18), 2861.
- Wang, Y., Xiao, R., Liu, S., Wang, P., Zhu, Y., Niu, T., & Chen, H. (2024). The impact of thermal treatment intensity on proteins, fatty acids, macro/micro-nutrients, flavor, and heating markers of milk—A comprehensive review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), 8670.
- Yaylayan, V. A., Huyghues-Despointes, A., & Feather, M. S. (1994). Chemistry of Amadori rearrangement products: analysis, synthesis, kinetics, reactions, and spectroscopic properties. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 34(4), 321-369.
- Zhang, W., Poojary, M. M., Rauh, V., Ray, C. A., Olsen, K., & Lund, M. N. (2019). Quantitation of α -dicarbonyls and advanced glycation endproducts in conventional and lactose-hydrolyzed ultrahigh temperature milk during 1 year of storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(46), 12863-12874.
- Zhang, W., Poojary, M. M., Rauh, V., Ray, C. A., Olsen, K., & Lund, M. N. (2020). Limitation of Maillard reactions in lactose-reduced UHT milk via enzymatic conversion of lactose into galactooligosaccharides during production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(11), 3568-3575.
- Zhang, W., Poojary, M. M., Olsen, K., Ray, C. A., & Lund, M. N. (2019). Formation of α -Dicarbonyls from Dairy Related Carbohydrates with and without N α -Acetyl-L-Lysine during Incubation at 40 and 50° C. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(22), 6350-6358.

- Zhang, W., Poojary, M. M., Rauh, V., Ray, C. A., Olsen, K., & Lund, M. N. (2019). Quantitation of α -dicarbonyls and advanced glycation endproducts in conventional and lactose-hydrolyzed ultrahigh temperature milk during 1 year of storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(46), 12863-12874.
- Zhang, W., Poojary, M. M., Rauh, V., Ray, C. A., Olsen, K., & Lund, M. N. (2020). Limitation of Maillard reactions in lactose-reduced UHT milk via enzymatic conversion of lactose into galactooligosaccharides during production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(11), 3568-3575.
- Zhang, W., Ray, C., Poojary, M. M., Jansson, T., Olsen, K., & Lund, M. N. (2018). Inhibition of Maillard reactions by replacing galactose with galacto-oligosaccharides in casein model systems. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(3), 875-886.

GIDALARDA MİKROPLASTİK KONTAMİNASYONU: DİYETLE MARUZİYET VE SAĞLIK ETKİLERİ

Hilal ARSLAN BAYRAKCI¹

1. GİRİŞ

Plastik, günlük yaşamın ve endüstrinin çeşitli alanlarında uygulama alanı bulan çok yönlü bir malzemedir. Son zamanlarda, plastik atık miktarında ciddi bir artış olmuştur. Müdahale edilmediği takdirde, yıllık kötü yönetilen plastik atık miktarının 2050 yılına kadar neredeyse iki katına çıkarak 121 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Pottinger vd., 2024). Plastiklerin biyotik bozunumu, organizmalar tarafından fiziksel eylemler (örneğin, ısırma, çiğneme veya sindirimsel parçalanma) veya biyokimyasal süreçler yoluyla sağlanır (J. Lin vd., 2025; K. Zhang vd., 2021).

Mikroplastikler (MP), aerodinamik çapı 5 mm'den küçük plastik parçalardır. Bunlar, dünya çapında sucul, karasal ve atmosferik ortamlarda yaygın olarak bulunur (Dris vd., 2016; Y. Liu vd., 2020). 1974 yılında MP'lerin ilk kez keşfedilmesinden bu yana (Colton vd., 1974), çoğu çalışma MP'lerin okyanuslar, deniz suyu (Green vd., 2018) ve nehirlerdeki oluşumuna (Zhao vd., 2019) veya çift kabuklu deniz hayvanları (J. Teng vd., 2019), balıklar (Baalkhuyur vd., 2018), karidesler (Hossain vd., 2020) ve deniz yosunları (Q. Li vd., 2020a) gibi sucul organizmalardaki oluşumuna odaklanmıştır. Kara organizmalarında ve atmosferde MP'lerin varlığı, son yıllarda, özellikle toprak, kuşlar ve kara

¹ Dr. Öğr. Üyesi Hilal Arslan Bayrakçı, Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0003-0069-4164.

bitkilerinde (Möller vd., 2020; Rillig vd., 2019) giderek popüler bir araştırma alanı haline gelmiştir. Çeşitli deniz ürünlerinde (örneğin, çift kabuklu deniz hayvanları, balık ve karides) MP'lerle ilgili veriler elde edilmiş olsa da (Fu vd., 2020), insanların günlük olarak tükettiği diğer gıdalarda, özellikle et ve sebzelerde MP'lerle ilgili veriler sınırlıdır. Bunun bir nedeni, gıdalardaki MP'leri belirlemek için standart yöntemlerin olmamasıdır (C.-L. Bai vd., 2022). Gıdalardaki MP bolluğu, aynı tür gıdayı analiz ederken bile çalışmalar arasında büyük ölçüde değişmektedir (Kim vd., 2018). Gerçek gıda kontaminasyonundaki farklılıkların yanı sıra, çalışmalar arasındaki metodolojik farklılıklar da bu olguya katkıda bulunan önemli bir faktördür (Q. Zhang vd., 2020).

MP çevrede her yerde bulunur, bu nedenle biyota, besin ağı veya çevresel maruziyet yoluyla MP'ler tarafından kirletilebilir ve etkilenebilir (C.-L. Bai vd., 2022). MP'ler bağırsaklarda birikebilir, bağırsak bakterilerinin bileşimini değiştirebilir ve deney farelerinde metabolik bozukluklara yol açabilir (Jin vd., 2019; Lu vd., 2018). Büyüme inhibisyonu, oksidatif hasar ve bağışıklık stresi gibi diğer olumsuz etkiler de gözlemlenmiştir (Kadac-Czapska vd., 2024).

Gıdaların MP'lerle kontaminasyonuna ve bunun hayvanlar ve hücreler üzerinde toksikolojik etkilerine dair çok sayıda kanıt bulunmasına rağmen, hala büyük bilinmeyen alanlar bulunmaktadır. Kapsamlı araştırmaların, güvenilir verilerin ve standartlaştırılmış metodolojilerin eksikliği, bilimsel olarak titiz sağlık riski değerlendirmeleri yapmayı son derece zorlaştırmaktadır (Meng vd., 2025).

Bu bölümde, çevresel ortamlardaki genel mikropplastik kirliliğinin ayrıntılı tartışılmasından ziyade, mikropplastiklerin gıda zincirindeki varlığı ve diyet yoluyla insan maruziyeti ele alınmaktadır. Bu amaçla, mikropplastiklerin başlıca kaynakları ve

gıda zincirine giriş yolları, farklı gıda gruplarında bildirilen mikroplastik seviyeleri güncel literatür ışığında değerlendirilmektedir. Ayrıca, diyetle mikroplastik alımına ilişkin mevcut tahminler, olası sağlık etkileri ve gıda güvenliği bağlamında maruziyetin azaltılmasına yönelik öneriler bütüncül bir çerçevede tartışılarak, araştırma boşluklarının ve gelecekteki çalışma alanlarının ortaya konulması amaçlanmaktadır.

2. MİKROPLASTİKLERİN YAPISI, SINIFLANDIRILMASI VE KAYNAKLARI

1940'lerden beri, düşük maliyetleri, geniş dayanıklılıkları, çok yönlülükleri ve modern yaşamın sayısız aktivitesinde uygulanmasına yardımcı olan mekanik dirençleri nedeniyle plastiklerin kullanımında artış kayıtları bulunmaktadır. Ambalajlamada polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET); polietilen (PE), polivinil klorür (PVC) ve polistiren (PS) dahil olmak üzere farklı plastik sınıfları kullanılmaktadır (Andrady, 2011). Bunların çoğu tek kullanımdan sonra ayrım gözetmeksizin atılmaktadır (Unuofin & Igwaran, 2023).

MP'ler, genellikle 1 µm ila 5 mm boyutunda, sentetik plastik polimerlerden yapılmış küçük plastik parçacıklardır. Su ve kara ortamlarında ortaya çıkan küresel kirleticiler olarak sınıflandırılırlar (Ali vd., 2021; Semmouri vd., 2023). Çevresel MP'ler birincil ve ikincil kökenler olarak alt gruplara ayrılabilir. Belirli bir amaç için belirli boyut aralığında MP'lerin kasıtlı olarak oluşturulmasına genellikle birincil mikroplastikler denir. Birincil MP'lere örnek olarak sentetik plastik elyaf, boncuklar, peletler, kişisel bakım ürünleri (yüz peelingleri, diş macunu, vücut yıkama jeli ve el yıkama), kaplamalar, boyalar, deterjanlar, inşaat malzemeleri ve gübreler verilebilir (Atugoda vd., 2021). Çevrede keşfedilen mikroplastiklerin büyük çoğunluğu, ağlar, plastik şişeler ve kozmetik ürünleri gibi büyük boyutlu plastik

eşyaların basınç, sıcaklık ve ısı gibi çeşitli çevresel faktörler tarafından parçalanmasıyla oluşan ikincil plastiklerdir (Ali vd., 2021; P. Wu vd., 2019).

Sulu bir ortamdaki MP'lerin boyutu, şekli ve rengi değişiklik gösterebilir. Temel fark, birincil ve ikincil MP'ler arasındadır. Endüstriyel olarak üretilen parçacıklar olan birincil MP'ler, düzenli, genellikle küresel veya lifli bir şekle sahiptir ve yüzeyleri tekdüzedir; hava koşullarının ve erozyonun ürünleri olan ikincil MP'ler ise genellikle belirsiz bir şekle sahiptir. Bununla birlikte, her iki MP türünün de hava koşullarının etkisiyle önemli ölçüde değişebileceği doğrudur (Crawford & Quinn, 2017).

MP'ler boyut ve şekil bakımından çeşitlilik gösterebildiği gibi, çok çeşitli renklerde de bulunabilirler. En yaygın renkler siyah, mavi, beyaz, şeffaf, kırmızı ve yeşildir. Özel bir durum ise "çok renkli" renk tonudur, çünkü bazı MP'lerin farklı kısımlarında farklı renkler olabilir. Bunlara ek olarak, mor, sarı, kahverengi, pembe ve diğerleri gibi renkler daha az oranda görülür. Renk, su organizmalarıyla ilgili çalışmalarda önemli kabul edilir, çünkü bazı türlerin renk tercihi davranışına dayanarak potansiyel olarak MP'leri yutabileceği düşünülmektedir. Ek olarak, renk aynı zamanda MP'lerin kirleticilerle ne ölçüde kirlendiğini de gösterebilir. Sarı ve siyah MP'ler kalıcı organik kirleticilerle en çok kirlenenlerdir (Karapanagioti vd., 2011), şeffaf ve beyaz MP'ler ise en çok deniz hayvanları tarafından yutulur (Crawford & Quinn, 2017). Hidalgo-Ruz vd. (2012)'ne göre, literatürde en sık beyaz, soluk sarı ve krem renkli MP'ler kaydedilmiştir. MP'lerin rengi, polimer türünü tahmin etmek için de kullanılabilir; çünkü temiz ve şeffaf MP'ler genellikle PP'den, beyaz ve mat MP'ler ise genellikle PE ve düşük yoğunluklu polietilenden (LDPE) yapılır. MP'lerin aşınma derecesi, yüzeyin aşınma ve solmasına göre de tahmin edilebilir (Hidalgo-Ruz vd., 2012).

3. GIDALARDA MİKROPLASTİKLERİN VARLIĞI

Daha önce yalnızca çevre kirleticisi olarak görülen MP'ler, artık gıda kirleticisi olarak değerlendirilmektedir. MP'lerin gıda güvenliği ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinin bilinmesi, risk değerlendirmesi için hayati önem taşımakta ve bu küresel tehdide karşı önemli bir çözüm sunmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, deniz ürünleri, içme suları, tuz, şeker, pirinç, sebze-meyve, süt ürünleri ve çeşitli işlenmiş gıdalar da dahil olmak üzere çok farklı ürün gruplarında MP partiküllerin saptandığını ve gıdalardaki bu kontaminasyonun artık istisnai bir durum değil, giderek yaygınlaşan bir olgu haline geldiğini göstermektedir.

3.1. Deniz Ürünlerinde Mikroplastikler

Her yıl, yaklaşık 4.6 ila 12.7 milyon ton plastiğin okyanusa karıştığı tahmin edilmektedir (Vital vd., 2021). Bu, deniz çöpünün yaklaşık %80'ini oluşturur ve bu nedenle dünya çapında bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Dahası, plastik partiküller, özellikle yenilebilir dokularda deniz ürünlerinde birikebilen kirleticiler arasındadır (Unuofin & Igwaran, 2023).

Gıda güvenliği ile ilgili kritik olarak kabul edilen şey, mikrobiyal kontaminasyon olsa da, gıdalardaki MP'lerin tespiti giderek halk ve çeşitli düzenleyici otoriteler tarafından kabul edilmektedir (Q. Liu vd., 2021). Dahası, MP'lerin sindirim sistemlerinden deniz yaşamının veya suda yaşayan organizmaların diğer dokularına geçme yeteneği, özellikle insan tüketimi için olan türler olmak üzere deniz ürünlerinin güvenliği konusunda endişeleri artırmıştır.

Deniz organizmaları, örneğin balıklar tarafından MP tüketimi, tesadüfi yutma (birincil) veya MP ile beslenen bir avın yutulması (ikincil) yoluyla meydana gelebilir (Nelms vd., 2018).

Son zamanlarda, deniz ürünlerinin MP'lerle kirlenmesi, dünya çapında gıda güvenliği için ortaya çıkan bir endişe olarak vurgulanmıştır. Bunların, kabuklular (F. Zhang vd., 2019), çift kabuklular (Zhao vd., 2018), memeliler (Nelms vd., 2018) ve balıklar (Yao vd., 2021) gibi çeşitli trofik seviyelerdeki besin ağı ve biyota dahil olmak üzere deniz ekosistemlerinin tüm bölümlerini kirlettiği bildirilmiştir. Üstelik, bunlar organizmaların farklı kısımlarına gömülmüşlerdir; bunlar arasında karaciğer (Collard vd., 2017), solungaçlar (Jaafar vd., 2021), kabuklu deniz ürünlerinin yenilebilir dokuları (karides, yengeç, kalamar) (Daniel vd., 2021), istiridye (*Crassostrea gigas*) (Saelee vd., 2021), taze ve işlenmiş midyeler (Nalbone vd., 2021) tekir balığı ve palamut gibi ticari balık türlerinin beyini ve kasları (Atamanalp vd., 2021) bulunur. Ancak, bu organizmaların bağırsaklarında MP'lerin saptanması, çoğu işleme sırasında çıkarıldığı için büyük bir sağlık riski oluşturmayabilir. Bununla birlikte, bazı ticari deniz ürünleri genellikle bağırsaklarıyla birlikte taze veya bütün (çift kabuklular) olarak tüketilir (Dowarah vd., 2020). Deniz ürünlerinde ve gıdalarda MP tespiti ile ilgili raporlarda muazzam bir artış var. Ancak, deniz ürünlerindeki MP'lerin boyutunu ve dağılımını daha iyi anlamayı kolaylaştıracak analitik tespit ve ayırma teknikleri henüz yeterince net değildir. MP'lerin analitik tespit teknikleri, parçacıkların hem morfolojik yapısı hem de kimyasal bileşimi hakkında bilgi edinmeyi gerektirecektir (Bogdanović vd., 2021).

Karidesler yaygın olarak tüketilen deniz ürünlerinden biridir ve besin zincirinde MP'lerin birikimi ve tropik taşınmasında hayati bir rol oynarlar. Genellikle bütün olarak tüketildikleri için doğrudan bir maruz kalma yolu oluşturabilirler ve sonuç olarak insan sağlığı ve gıda güvenliği için bir tehdit oluşturabilirler (Dowarah vd., 2020). Karidesler ve dekapod kabuklular (yengeçler, ıstakozlar, karidesler ve kerevitler) gibi diğer deniz ürünleri, daha büyük balıklara kıyasla MP'lerden

büyük ölçüde etkilenirler, çünkü MP'ler boyut olarak küçüktür ve karidesler yollarına çıkan her şeyi yerler. Bu davranışın bir sonucu olarak, karidesler yanlışlıkla veya bilerek küçük MP parçacıklarını yutarlar ve bunları bağırsaklarında biriktirirler (Curren vd., 2020). Bu bağlamda, su ortamındaki çeşitli kaynaklardan gelen kimyasal plastik katkı maddeleri ve diğer organik kirleticiler bunlara adsorbe edilir (Farady, 2019), böylece hayvan ve insan sağlığı için gizli bir tehdit oluştururlar. Bu tür plastik katkı maddelerine örnek olarak şunlar verilebilir: polivinil klorür (PVC) ve yüksek yoğunluklu polietilene (PE) düzenli olarak eklenen ve plastiklerin yüksek termostabilitesini elde etmek için kullanılan endokrin bozucu bir kimyasal (EDC) olan nonilfenol (M. Wu vd., 2020). Bazı plastik türlerinde bulunan ve bir EDC'nin karakteristik özelliği olan östradiol benzeri aktiviteye sahip bir plastikleştirici olan Bisfenol A (BPA) nın obeziteye neden olduğu bulunmuştur (Talsness vd., 2009).

3.2. İçme Sularındaki Mikroplastikler

Çevrede MP'lerin yaygın varlığı yadsınamaz bir gerçektir (Bäuerlein vd., 2022). Tatlı su ortamlarındaki mikroplastik kayıtları, özellikle nehirlerde, göllerde, rezervuarlarda ve yeraltı sularında sürekli olarak genişletilmekte ve güncellenmektedir. Tüm bunlar, içme suyunun kaynağı olmaları nedeniyle içme suyundaki MP sorununu vurgulamaktadır (Semmouri vd., 2023b; WHO, 2019).

İçme suyundaki MP'lerin incelenmesi, tatlı su ortamlarındaki çalışmaların bir uzantısı ve gelişmiş halidir. Bunların oluşumu ve etkileri üzerine hedefli araştırmalar 2018 yılında, başlangıçta şişelenmiş suya odaklanılarak başladı (Choudhary vd., 2020; Oßmann vd., 2018; Schymanski vd., 2018). O zamandan beri, musluk suyunda, içme suyu arıtma

tesislerinde ve su tedarik zincirinde MP'ler bildirilmiştir (Chu vd., 2022; Ding vd., 2021; Shruti vd., 2022; Taghipour vd., 2023).

İçme suyundaki MP'lerle ilgili çalışmalar Avrupa, Asya ve Amerika'ya odaklanmıştır. MP'ler yaygın olarak bulunmuştur ve boyut ve bolluk bakımından önemli farklılıklar göstermektedir (L. Yang vd., 2024). Çoğu şişelenmiş suda bildirilen MP seviyeleri 400 parça/L'den azdır (Almaiman vd., 2021; LI vd., 2023; Makhdoumi vd., 2021; Nizamali vd., 2023; Schymanski vd., 2018b; X. X. Zhou vd., 2021). Çin'de bulunan 23 şişelenmiş su markasında düşük seviyelerde MP (2-23 parça/L) bulundu ve tespit limiti 25 µm idi (X. jun Zhou vd., 2021). Suudi Arabistan'dan gelen şişelenmiş suda da düşük bir değer bulundu (Almaiman vd., 2021). Bavyera'da tedarik edilen maden suyunda yüksek seviyelerde MP bulundu (Oßmann vd., 2018). Ancak, 10 µm'den küçük MP'lerin hedef alındığı İtalya'daki maden sularında özellikle yüksek bir değer ($5,42E+07 \pm 1,95E+07$ parça/L) gözlemlendi (Zuccarello vd., 2019). Musluk suyuna odaklanan çoğu çalışmada 10 parça/L'den az mikropplastik seviyeleri bildirilmiştir (Almaiman vd., 2021; Taghipour vd., 2023; M. Zhang vd., 2020). Çin'in Tianjin kentindeki Mexico City'de ve Japonya, ABD ve Avrupa'daki 12 şehirdeki ücretsiz içme suyu çeşmelerinde nispeten düşük değerler bulunmuştur (Mukotaka vd., 2021; Shruti, Pérez-Guevara, & Kutralam-Muniasamy, 2020). Çin'in ChangSha kentinden (Shen vd., 2021), Çin'in 38 farklı şehrinden (Tong vd., 2020), Brezilya'nın Brasilia kentinden (Pratesi vd., 2021) ve Güney Brezilya'daki Sinos Nehri'nden (Ferraz vd., 2020) alınan musluk suyu örneklerinde yüksek miktarda (≥ 100 ürün/L) MP tespit edildi. İzlanda'nın Akureyri kentindeki musluk suyunda sınırlı miktarda PE (2 µg/L) ve PVC (1,5–5,2 µg/L) tespit edildi (Ásmundsdóttir vd., 2020). Hangzhou'daki musluk suyunda 58–255 nm aralığındaki nanoplastikler en bol miktardaydı ve konsantrasyonları 1,67–2,08 µg/L idi (Y. Li vd., 2022). Almanya'daki bir şehirden

(Rüsselsheim) alınan 0,5-1,3 m³ musluk suyu örneklerinde MP tespit edilmedi, ancak bakır ftalosiyanın (pigmentler) 113 ± 83 madde/ m³ bolluğunda tespit edildi (Weber vd., 2021).

Toplanan veriler, içme suyu arıtma tesislerinde (DWTP) ve musluk suyunda bulunanlardan daha yüksek seviyelerde olduğu görülen şişelenmiş suda yüksek oranda MP tespit edildiğini göstermiştir (Acarer, 2023; Kirstein, Gomiero, vd., 2021). Çin'in Pekin kentinde yapılan bir araştırma, aynı analiz yöntemini kullanarak şişelenmiş suyun musluk suyundan daha fazla MP içerdiğini bulmuştur (LI vd., 2023). Bunun nedeni, şişelenmiş suyun paketleme, taşıma ve depolama sırasında plastik parçacıklardan kaynaklanan kontaminasyona daha duyarlı olması ve plastik şişelerin kendilerinin MP'leri salabilmesi olabilir (Makhdoumi vd., 2021). Ancak, cam ambalajlı içme sularının da düşük seviyelerde MP içermesi ve tespit edilebilir MP boyutlarının farklı olması nedeniyle bu aşamada kesin sonuçlara varılamaz (Kirstein, Gomiero, vd., 2021).

İçme suyundaki MP kayıtları sürekli olarak genişletilmekte ve güncellenmektedir; bu da insanların bu kirleticilere maruz kalması için kritik bir yol görevi görmektedir. Senathirajah vd. (2021), insanların MP alımını değerlendirmek için 59 çalışmadan veri sentezledi ve içme suyu yoluyla kişi başına ortalama yıllık 9029~174.959 MP/L alımını ortaya koydu; bu da 25,3-489,7 g'lık bir kütleyle eşdeğerdir ve ortalama değeri 257,5 g'dır. Genellikle "daha güvenli" bir alternatif olarak algılanan şişelenmiş suda da, paketleme malzemeleri, üretim süreçleri ve depolama koşullarından etkilenen MP'ler içerdiği bulunmuştur (Oßmann vd., 2018; Senathirajah vd., 2021; Zuccarello vd., 2019). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi, 150 µm'den büyük MP'lerin insan vücudu tarafından emilmesinin olası olmadığını, 1,5 µm'den küçük olanların ise organlara nüfuz edebileceğini ileri sürmektedir (Kirstein, Hensel, vd., 2021). Son çalışmalar, MP'lerin biyolojik engelleri aşabildiğini, sindirim

sistemi (Özsoy vd., 2024), dolaşım sistemi (Leslie vd., 2022), boşaltım sistemi (Yan vd., 2022) ve anne-fetüs arayüzleri (Ragusa vd., 2021)dahil olmak üzere birden fazla fizyolojik sisteme sızabildiğini göstermektedir. Özellikle, MP'ler yakın zamanda insan kemik iliğinde tanımlanmıştır (Guo vd., 2024). Uzun vadeli sağlık etkileri henüz belirsiz olsa da, ortaya çıkan kanıtlar insan sağlığı üzerinde olası olumsuz etkilere işaret etmektedir (Cai vd., 2025).

3.2.1.Su Şişeleri ve Damacanalardan Mikroplastik Salınımı

Ambalaj malzemelerinden içsel salınım birincil kaynağı oluşturur. Plastik şişe/fıçı gövdeleri çoğunlukla polikarbonat, PE, PET ve HDPE'den oluşurken, şişe kapakları tipik olarak PS, HDPE ve LDPE'den yapılır (Guart vd., 2011). Plastik su şişelerinin mekanik etkilerden dolayı taşıma, kullanım ve kapatma sırasındaki deformasyonu da MP salınımına yol açabilir. Çalışmalar, şişelerin ve kapakların polimer tiplerinin şişelenmiş suda bulunan baskın MP polimerlerine karşılık geldiğini doğrulamaktadır (Oßmann vd., 2018; Schymanski vd., 2018). Şişe temizleme işlemleri ve doldurma sırasındaki mekanik eylemler MP kontaminasyonuna daha fazla katkıda bulunur. Weisser vd. (2021) dört maden suyu şişeleme hattından beş örnek türü topladı: ham su, demirden arındırılmış su, yıkandıktan sonra temizlenmiş şişeler, doldurulmuş şişeler ve kapaklı ürünler. Sonuçlar, şişeleme sırasında MP konsantrasyonlarının <1 MP/L'den 317 ± 257 MP/L'ye yükseldiğini ve %81'inin PE olarak tanımlandığını gösterdi; bu, üretim ekipmanının malzemeleriyle oldukça tutarlıdır. Taşıma ve depolama sırasındaki çevresel stres MP salınımını artırır. Titreşimler, şişeler/variller ve kapaklar arasında sürtünmeye ve varillerdeki su ile su dağıtıcıları arasındaki arayüzde aşınmaya neden olur. Sıcaklık dalgalanmaları polimer moleküler kuvvetlerini bozarak MP saçılımını tetikler. Gazlı içeceklerdeki çözünmüş CO₂, iç basıncı

artırarak şişe duvarlarındaki stresi yükseltir ve MP saçılımını güçlendirir (Schymanski vd., 2018), bu da durgun suya kıyasla gazlı suda daha yüksek MP seviyelerini açıklar.

Güneş ışığına maruz kalma ve suyun kimyasal özellikleri gibi ek faktörler MP kontaminasyonuna daha fazla katkıda bulunur (Zuccarello vd., 2019). Sert plastikler daha büyük plastik parçacıkları salma eğilimindeyken, deforme olabilen plastikler ve zayıf alkali pH değerleri daha küçük boyutlu plastiklerin sayısını artırır (Zuccarello vd., 2019). Şişe kapaklarının sık sık açılıp kapanması mekanik stres oluşturur ve hem şişe gövdesinden hem de kapaklardan parçacıkların veya parçaların ayrılıp suya girmesine neden olarak MP kontaminasyonunu artırır (Singh, 2021). Özellikle, tekrar kullanılabilir PET su şişeleri, tekrarlanan kullanımları nedeniyle daha fazla yıkama, doldurma ve mekanik stres döngüsüne maruz kalır ve bu da genellikle tek kullanımlık PET şişelere kıyasla önemli ölçüde daha fazla MP salınımına neden olur. Cam şişeli suda bile, MP'ler öncelikle plastik kapaklarla arayüzdeki aşınmadan kaynaklanır ve bu da suya giren MP sayısının artmasına neden olur ve karışık malzemeli ambalajlarla ilişkili çapraz kontaminasyon risklerini vurgular (Oßmann vd., 2018; Schymanski vd., 2018).

3.3. Diğer Gıdalarda Mikroplastiklerin Varlığı

Gıdalarda bulunan MP'lere yönelik araştırmalar deniz ürünleri ve sulara daha çok ağırlık verse de son yıllarda diğer gıda gruplarında MP'lerle ilgili araştırmalara yoğunluk verilmiştir.

MP kontaminasyonu yalnızca deniz ürünlerinde değil, aynı zamanda diğer gıdalarda da meydana gelir. Tüketiciler tarafından yılda yaklaşık $(3,9 - 5,2) \times 10^4$ MP'nin dolaylı olarak gıda yoluyla (örneğin tuz, bal, şeker, deniz ürünleri, şişelenmiş su, musluk suyu ve alkol) alındığı tahmin edilmektedir (Cox vd., 2019).

Vitamin, mineral ve diyet lifi açısından önemli kaynaklar olan sebze ve meyveler de MP kontaminasyonundan kaçamamıştır. Kara bitkilerine odaklanan sınırlı çalışmalara göre elma, armut, domates vb. bitkilerin iç dokularında 1,5 -190 MP/g bulunmuştur (Aydın vd., 2023).

Kara bitkilerinin yanı sıra, MP'ler mağazadan satın alınan deniz yosunu norisinde (0,9 -3,0 MP/g) ve pirinçte (52 -283 µg/g) de bulunur (Dessi vd., 2021; Q. Li vd., 2020b). Pişirmeden önce suyla iyice yıkandıktan sonra, pürüzsüz yüzeye sahip deniz yosunu norisindeki MP miktarı %94,5 oranında azaltılabilir (Q. Li vd., 2020b). Benzer şekilde, pirincin durulanması MP seviyelerini etkili bir şekilde azaltmıştır (Dessi vd., 2021).

İçeceklerdeki MP kontaminasyonuna ilişkin ilk araştırma, Liebezeit & Liebezeit (2014) tarafından gerçekleştirilmiş ve Almanya'dan gelen biraya odaklanılmıştır (sırasıyla bolluk: 2 -79 lif/L, 12 -109 parçacık/L ve 2 -66 granül/L). Meksika'dan gelen birada daha düşük bolluk oranları bildirilmiştir (tespit edilmedi (ND) -28 parçacık/L) (Shruti, Pérez-Guevara, Elizalde-Martínez, vd., 2020). MP'ler ayrıca süt, beyaz şarap, soğuk çay, enerji içeceği ve meşrubat gibi diğer içeceklerde de tespit edilmiştir. Ekvador'daki sütte (40 MP/L) ve meşrubatlarda (32 MP/L) (Diaz-Basantes vd., 2020), Meksika'daki sütte (6,5 MP/L) ve meşrubatlarda (ND-7) bulunanlara kıyasla daha yüksek bolluk bulundu (Kutram-Muniasamy vd., 2020). Bu durum, su kaynakları, paketlenme ve işleme süreçlerindeki MP kirlilik derecelerindeki farklılıklara ve kullanılan tespit yöntemlerindeki farklılıklara bağlanabilir (Meng vd., 2025).

Sofra tuzu yaygın olarak kullanılan bir çeşnidir. Şimdiye kadar, dünyanın dört bir yanındaki (Çin, Avustralya, Hindistan, İspanya vb.) 100'den fazla sofra tuzu markasının, bolluğu 0 ila 2×10^4 MP/kg arasında değişen MP içerdiği bulunmuştur (Q. Zhang vd., 2020). Çoğu durumda, deniz tuzunda kaya tuzu veya

göl tuzuna kıyasla daha yüksek MP bolluğu bulunmuştur; bu, kıyı bölgelerindeki yüksek MP seviyesinden kaynaklanıyor olabilir (D. Yang vd., 2015). Ancak, İniguez vd. (2017) bu tür kaynağa özgü farklılıklar gözlemlememiştir. Kaya tuzlarındaki MP varlığı, bu parçacıkların potansiyel olarak toplama, taşıma, kurutma veya paketleme işlemleri sırasında ortaya çıkabileceği anlamına gelir (Meng vd., 2025).

Şeker, rafine edilmiş ve rafine edilmemiş olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Rafine şekerde (249 MP/kg), rafine edilmemiş şekere (1100 MP/kg) kıyasla nispeten bol miktarda MP bulunmuştur (Liebezeit & Liebezeit, 2013). Bu durum, saflaştırma adımlarıyla safsızlıkların azaltılmasından kaynaklanıyor olabilir.

Yukarıdaki gıda maddelerine ek olarak, insanlar bal, yumurta ve bebek süt tozu yoluyla da MP'leri alabilirler. Modern, hızlı tempolu yaşam tarzımızda giderek daha popüler hale gelen paket servis yiyeceklerde MP'lerin keşfedildiğini belirtmekte fayda var (C. L. Bai vd., 2022). Bu nedenle, genellikle süpermarketlerde, marketlerde veya internette satılan önceden paketlenmiş yemekler gibi yiyecekler de dikkat gerektirir. Yine de, sonraki maruz kalma değerlendirmesini ve risk değerlendirmesini destekleyen kapsamlı veri toplamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Meng vd., 2025).

4. MİKROPLASTİKLERİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNE ETKİLERİ

Yutulduktan sonra, gıdalardaki MP'ler ilk olarak gastrointestinal sisteme ulaşır. Bazıları dışkı ile atılır. 2019 yılında, insan dışkısında ilk kez MP'ler bulundu (20 MP/10 g), sonraki çalışmalar 20 ila 800 µm arasında değişen boyutlarda yaygın fekal MP kontaminasyonunu doğruladı (Meng vd., 2025). Ayrıca, daha fazla plastik çatal bıçak takımı ve kap kullanılması

nedeniyle bebek dışkılarının yetişkinlere göre daha fazla MP içerdiği bulunmuştur (J. Zhang vd., 2021).

Bugüne kadar, MP'lerin insan vücudundaki biyolojik dağılımı hakkında kesin bir sonuca varılamamıştır (Meng vd., 2025).Deng vd. (2017), fareleri beş hafta boyunca PS parçacıklarına maruz bırakmış ve uygulanan parçacıkların %28'inin (20 µm) sindirim sisteminden karaciğere taşındığını bulmuşlardır. Bu yüksek oran sorgulanmıştır; diğer çalışmalar, özellikle MP'ler için (<%1) çok daha düşük taşınma verimlilikleri bildirmektedir (Böhmert vd., 2019).

MP'lerin fizikokimyasal özellikleri insan sağlığını etkilemede önemli bir rol oynar. Örneğin, daha küçük boyutlu parçacıklar ve ultra ince lifler, insanlar için nispeten daha tehlikeli MP türleri olarak kabul edilir. MP'lerin oluşturduğu sağlık tehlikeleri, doğrudan ve dolaylı tehlikeler olarak kategorize edilebilir. Doğrudan tehlikeler, MP parçacıklarının yutulması nedeniyle çeşitli organlarda fizyolojik yaralanmalar gibi, MP'lerin kendilerinin neden olduğu ani fiziksel hasarları ifade eder. Dolaylı tehlikeler, plastik üretim sürecinde kullanılan katkı maddeleriyle ilişkili risklerin yanı sıra, MP'lerin toksik kimyasalları adsorbe eden taşıyıcılar olarak hareket etme ve böylece insan sağlığı için risk oluşturma potansiyeliyle ilgilidir (Cai vd., 2025).

Daha küçük parçacık boyutlarına sahip MP'ler insan vücudu tarafından daha kolay emilir. 150 µm'den daha küçük MP'lerin gastrointestinal epitelyumu kolayca geçebildiği, yaklaşık 10 µm boyutundaki MP'lerin plasenta ve kan-beyin bariyerlerini geçebildiği ve hatta 2,5 µm'lik daha küçük MP'lerin endositoz yoluyla sistemik dolaşıma ulaşabildiği bildirilmiştir (Kannan & Vimalkumar, 2021). Huang vd. (2024), normal solunum hızları altında MP'lerin burun boşluğunun iç yüzeyinin yarısını kaplayabileceğini göstermiştir. Daha büyük boyutlu

MP'lerin üst solunum yolunda hızla birikme olasılığı daha yüksekken, daha küçük nanoplastiklerin kaçma veya daha derin solunum seviyelerine ulaşma kapasitesi daha yüksektir. İnsan vücudu tarafından emildikten sonra MP'ler bağışıklık fonksiyonunu bozma, içselleştirme yoluyla tıkanıklık ve damar iltihabına neden olma, pulmoner arteriyel hipertansiyon, sistemik inflamatuvar yanıtlar ve kan hücresi toksisitesi gibi çeşitli fizyolojik hasara neden olabilir. Bunlar ayrıca doğrudan veya dolaylı olarak insan metabolizmasını ve enerji dengesini değiştirebilir ve sitotoksositeye, nörotoksositeye, üreme toksisitesine ve kanserojenliğe yol açan oksidatif stres etkilerine neden olabilir (Rahman vd., 2021).

MP'lerin öncül plastikleri, aralarında katkı maddelerinin de bulunduğu çok çeşitli kimyasal maddeler içerir; bunlar arasında plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, renklendiriciler, stabilizatörler vb. bulunur. Diğer katkı maddeleriyle karşılaştırıldığında, plastikleştiriciler (özellikle ftalatlar ve bisfenol A) tehlikeleri açısından daha kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Eker vd. (2021), serum bisfenol A düzeyleri ile fonksiyonel olmayan adrenal insidentalomalar arasında pozitif bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Alev geciktirici görevi gören polibromlu difenil eterler (PBDE'ler), oksidatif stresi tetikleyebilir, hormonları bozabilir ve dokularda moleküler karsinogeneze neden olabilir. Dahası hem MP'lere hem de alev geciktiricilere maruz kalma, farelerde oksidatif stres kaynaklı nörotoksositeyi artırabilir (Deng vd., 2021).

MP'ler, ağır metaller ve organik kirleticiler gibi çevreden diğer kirleticileri adsorbe edebilir ve daha sonra bunlarla sinerjik veya antagonistik bir şekilde etkileşime girebilir. Bu, genel toksisiteyi ve fizikokimyasal özellikleri değiştirerek insan hastalığı riskini artırabilir. Özellikle, daha büyük yüzey alanı/hacim oranına sahip daha küçük boyutlu MP'ler, kirleticileri adsorbe etme ve salma, ayrıca hücrelere ve dokulara nüfuz etme

ve bozma konusunda daha güçlü bir kapasiteye sahiptir. Bu kimyasallar insan endokrin sistemine müdahale ederek bağışıklık sistemini, üreme sistemini ve insan vücudunun diğer fizyolojik işlevlerini etkileyebilecek hormonal dengesizliklere neden olabilir (Cai vd., 2025).

Mikroplastiklerin solunması, insan vücudunun bir diğer kirlenme yoludur (Karbalaei vd., 2018). İnsan vücudundaki mikroplastiklerin küçük bir kaynağı ise cilt temasıdır (Campanale vd., 2020).

Dokularda MP birikimi insan toksisitesine önemli bir katkıda bulunur. 10 µm'den küçük MP'ler bağırsak lümeninden insan dolaşım sistemine girebilir ve karaciğer, böbrekler ve beyin dahil olmak üzere dokularda sistemik maruziyete ve birikime yol açabilir. 0,1 µm'den küçük MP'ler hücre zarları, plasenta ve beyin dahil olmak üzere çeşitli organlara nüfuz edebilir (Prüst vd., 2020; Yong vd., 2020). Beyindeki MP'ler oksidatif strese neden olur, nöronal hücrelere zarar verir ve asetilkolinesteraz aktivitesini inhibe ederek de dahil olmak üzere nörotransmitter seviyelerini değiştirir; bu da nöronal hastalıklarla ilişkili olabilir (Prüst vd., 2020). Kapsamlı hayvan modelleri ve in vitro deneyler, MP'lerin hidrojen peroksit enzim aktivitesini artırdığını, süperoksit dismutaz (SOD)/glutatyon peroksidaz (GSH-Px)'ı indüklediğini, katalaz (CAT) aktivitesini azalttığını ve sinir hücrelerinde asetilkolinesteraz (AChE) aktivitesini inhibe ettiğini göstermiştir (Deng vd., 2017; Varó vd., 2019). Uzun süreli MP maruziyeti, hipokampüste sinaptik α-amino-3-hidroksi-5-metil-4-izoksazol-propiyonik asit (AMPA) reseptörlerini güçlendirir, nöroinflamasyonu artırır ve vagus sinir yolu aracılığıyla öğrenme ve hafıza yeteneklerini etkiler (Lee vd., 2022). MP'lere ve demire birlikte maruz kalma, yaşlı farelerde demir kaynaklı nörodejenerasyon yoluyla bilişsel gerilemeyi hızlandırır (X. Liu vd., 2022). MP'lerin beyin fonksiyonu üzerindeki etkisi, beyin-bağırsak-mikrobiyota

ekseninin düzensizliğinden de kaynaklanabilir, çünkü bağırsaklardaki maruziyet mikrobiyomu ve mikrobiyal metabolitleri değiştirir ve böylece çeşitli nörotransmitterlerin seviyelerini değiştirir (M. Teng vd., 2022).

MP'ler, gıda yoluyla insan vücuduna doğrudan girmenin ötesinde, çeşitli ortamlar (hava, su ve yenilebilir organizmalar) aracılığıyla çevreye bakteriyel patojenler yayar ve dolayısıyla patojenleri gıdayla birlikte insan vücuduna sokar (Junaid vd., 2022). Dahası, mükemmel adsorpsiyon kapasiteleri sayesinde MP'ler çevrede çeşitli kirleticileri, mikropları ve toksik kimyasalları biriktirerek dolaylı olarak yerleşik organizmaları etkiler (Green vd., 2016). Bu nedenle, MP'lerin gerçek yaşam koşulları altında dolaylı toksisitesini, potansiyel mekanizmalarını ve uzun vadeli etkilerini tam olarak anlamak için acilen daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

4.1. Mikroplastiklerle Mikroorganizmalar Arasındaki İlişki

MP'ler çevredeki çok sayıda potansiyel patojenin taşıyıcısıdır, mikrobiyal kolonizasyon ve biyofilm oluşumu için sert substratlar görevi görür ve zararlı mikroorganizmaların büyümesi için uygun koşullar sağlar (W. Yang et al., 2023). MP yüzeyleri mikroplar, virüsler ve çeşitli zararlı salgılar (örn. lipopolisakkaritler, alerjenler ve antibiyotikler) için katı destekler görevi görür, antijenik özellikleri değiştirir ve konakçılarda anormal bağışıklık tepkilerine neden olur (W. Yang vd., 2023). MP yüzeyi ne kadar pürüzlüyse, zararlı bakterilerin büyümesi için o kadar elverişlidir. Örneğin, *Vibrio* türleri pürüzlü MP yüzeylerinde biyofilmler oluşturabilir ve bu da tüketicide *Vibrio* bolluğunda anormal bir artışa yol açabilir (Jang vd., 2022). Ek olarak, farklı malzemelerden yapılmış MP'ler üzerindeki bakteri toplulukları, çevreleyen ortamdakilerden belirgin şekilde farklılık gösterir ve zararlı bakteri sayısının

artmasıyla karakterize edilir (Zettler vd., 2013). Zararlı mikroorganizmalar için yaşam alanı sağlamanın yanı sıra, MP'ler faydalı çevresel mikroplar üzerinde önemli bir engelleyici etki gösterir, böylece mikrobiyal toplulukların bileşimini değiştirir ve ekolojik dengeyi tehdit eder (X. Zhang vd., 2021). Daha da önemlisi, MP'ler doğal ortamda ayrıştıkça, yüzey alanları, mekansal yapıları ve yüzey yükü özellikleri, zararlı mikroorganizmalar, virüsler ve küçük moleküllü alerjenler için adsorpsiyon kapasitelerini artıran önemli değişikliklere uğrar (W. Yang vd., 2023). Bu nedenle, tüketicilere zararlı mikroorganizmaların, virüslerin ve alerjenlerin bulaşmasını önlemek için gıdalarda MP birikiminin ve ayrışmasının derhal önlenmesi çok önemlidir (Xu vd., 2025).

4.2. Mikroplastiklerin Ağır Metaller ve Diğer Kirleticiler İçin Taşıyıcı Rolü

Çevredeki ağır metal iyonları sebzelerin, meyvelerin ve et hayvanlarının büyümesinde önemli rol oynar. Ancak büyüme sırasında bu iyonların aşırı birikimi (yenilebilir standartların aşılması) gıdalarda aşırı ağır metal alımının birincil nedeni olabilir (S. He vd., 2022). Çevresel MP'ler toprak ve su kaynaklarında ağır metallerin birikmesini kolaylaştırabilir. Çevredeki ağır metal iyonlarının adsorbanları olarak MP'ler, yaşla birlikte artan adsorpsiyon kapasiteleriyle Ag, Cd, Co, Cr ve As gibi toksik metalleri etkili bir şekilde biriktirebilir (B. He vd., 2020). Son araştırmalar MP'ler ile gıdalardaki ağır metal iyonlarının birikimi arasındaki ilişkiyi doğruladı. Örneğin, su kaynaklarındaki MP'ler toksik ağır metallerin taşıyıcısı olarak hareket eder ve balıkları ve büyük omurgasızları (Sarkar vd., 2021) ve ayrıca çoğu bitki ve mantarı (Wang vd., 2020) kirlendir. MP'lerin ağır metalleri su ürünlerine aktarma yeteneği beklenenden çok daha yüksektir (Jang vd., 2022). MP'ler tarafından biriktirilen ağır metallerin dağılımı farklı organlar arasında önemli ölçüde değişir; karaciğer en zengin organdır

(Martinez-Tavera vd., 2021). Karaciğerdeki ağır metaller hepatosit apoptozuna neden olabilir ve glikoliz akışını değiştirebilir (S. Li vd., 2021), bağışıklık sistemini ve büyümeyi olumsuz etkileyebilir (Jinhui vd., 2019). Bu nedenle, MP'lerin ve toksik metal iyonlarının adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerinin anlaşılması, bunların etkili bir şekilde kontrol edilmesini kolaylaştırabilir (W. H. Lin vd., 2023).

MP'ler vücuttaki çeşitli toksinlerin birikimini hızlandıran zararlı bileşiklerin taşıyıcılarıdır; ancak bu konu henüz kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. Örneğin, polistiren nanoplastikler bisfenol-A taşıyıcıları olarak hareket edebilir, beyindeki seviyelerini artırabilir ve potansiyel olarak beyin hastalıklarına yol açabilir (Chen vd., 2017). Harici mikrobiyal toksinler, geniş spektrumlu antibiyotikler ve hücre dışı polimerler çeşitli yollarla MP'lere bağlanabilir, böylece farklı türler arasında bulaşmalarını hızlandırabilir ve önemli insan organlarında (karaciğer ve bağırsaklar) taşınmalarını ve birikimlerini kolaylaştırarak aşırı inflamatuvar yanıtlara yol açabilir (Hollóczki & Gehrke, 2019). Bu olgu, MP'lerin "Truva atı" etkisiyle ilişkili olabilir (Y. Zhang & Goss, 2021).

5. SONUÇ

Mikroplastikler, çevresel yaygınlıklarının doğal bir uzantısı olarak artık yalnızca ekolojik bir sorun değil, aynı zamanda gıda zinciri üzerinden insan maruziyetiyle ilişkili bir gıda güvenliği meselesidir. Deniz ürünleri ve içme suları başta olmak üzere çok sayıda gıda grubunda mikroplastiklerin saptanması; ambalaj, işleme, taşıma ve depolama gibi aşamalarda kontaminasyonun artabildiğini göstermektedir. Buna karşın, çalışmalar arasında bildirilen düzeylerin geniş aralıkta değişmesi; örnek hazırlama, kontaminasyon kontrolü, tespit limitleri ve polimer doğrulama yaklaşımlarındaki metodolojik farklılıklara

işaret etmekte ve güvenilir maruziyet/risk değerlendirmelerini zorlaştırmaktadır.

Mevcut kanıtlar, özellikle küçük boyutlu parçacıkların biyolojik bariyerleri aşabilme potansiyeli, bağırsak mikrobiyotası ve inflamasyonla ilişkili etkiler ve mikroplastiklerin katkı maddeleri ile çevresel kirleticiler için “taşıyıcı” rolü üzerinden dolaylı toksisite olasılığını desteklemektedir; ancak insanlarda uzun dönem klinik sonuçlar açısından belirsizlik sürmektedir. Bu nedenle, standartlaştırılmış analitik protokoller, gıda matrikslerine özgü karşılaştırılabilir veri üretimi, gerçekçi maruziyet senaryoları ve özellikle nanoplastiklere odaklanan mekanistik çalışmalar öncelikli görünmektedir. Eş zamanlı olarak, ambalaj/işleme kaynaklı salınımı azaltan iyi uygulamalar ve maruziyet azaltma stratejileri, ihtiyatlı yaklaşım çerçevesinde gıda güvenliği politikalarına entegre edilmelidir.

KAYNAKÇA

- Acarer, S. (2023). Abundance and characteristics of microplastics in drinking water treatment plants, distribution systems, water from refill kiosks, tap waters and bottled waters. *Science of The Total Environment*, 884, 163866. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.163866>
- Ali, I., Cheng, Q., Ding, T., Yiguang, Q., Yuechao, Z., Sun, H., Peng, C., Naz, I., Li, J., & Liu, J. (2021). Micro- and nanoplastics in the environment: Occurrence, detection, characterization and toxicity – A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127863. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127863>
- Almaiman, L., Aljomah, A., Bineid, M., Aljeldah, F. M., Aldawsari, F., Liebmann, B., Lomako, I., Sexlinger, K., & Alarfaj, R. (2021). The occurrence and dietary intake related to the presence of microplastics in drinking water in Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), 390. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09132-9>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2011.05.030>
- Ásmundsdóttir, Á. M., Gomiero, A., & Øysæd, K. B. (2020). *Microplastics and Nanoplastics Occurrence and Composition in Drinking Water from Akureyri Urban Area, Iceland* (pp. 106–111). https://doi.org/10.1007/978-3-030-45909-3_18
- Atamanalp, M., Köktürk, M., Uçar, A., Duyar, H. A., Özdemir, S., Parlak, V., Esenbuğa, N., & Alak, G. (2021). Microplastics in Tissues (Brain, Gill, Muscle and

- Gastrointestinal) of *Mullus barbatus* and *Alosa immaculata*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 81(3), 460–469. <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00885-5>
- Atugoda, T., Vithanage, M., Wijesekara, H., Bolan, N., Sarmah, A. K., Bank, M. S., You, S., & Ok, Y. S. (2021). Interactions between microplastics, pharmaceuticals and personal care products: Implications for vector transport. *Environment International*, 149, 106367. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106367>
- Aydın, R. B., Yozukmaz, A., Şener, İ., Temiz, F., & Giannetto, D. (2023). Occurrence of Microplastics in Most Consumed Fruits and Vegetables from Turkey and Public Risk Assessment for Consumers. *Life*, 13(8), 1686. <https://doi.org/10.3390/life13081686>
- Baalkhuyur, F. M., Bin Dohaish, E. J. A., Elhalwagy, M. E. A., Alikunhi, N. M., AlSuwailem, A. M., Røstad, A., Coker, D. J., Berumen, M. L., & Duarte, C. M. (2018). Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea coast. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 407–415. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.04.040>
- Bai, C. L., Liu, L. Y., Guo, J. L., Zeng, L. X., & Guo, Y. (2022). Microplastics in take-out food: Are we over taking it? *Environmental Research*, 215, 114390. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114390>
- Bai, C.-L., Liu, L.-Y., Hu, Y.-B., Zeng, E. Y., & Guo, Y. (2022). Microplastics: A review of analytical methods, occurrence and characteristics in food, and potential toxicities to biota. *Science of The Total Environment*, 806, 150263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150263>

- Bäuerlein, P. S., Hofman-Caris, R. C. H. M., Pieke, E. N., & ter Laak, T. L. (2022). Fate of microplastics in the drinking water production. *Water Research*, 221, 118790. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.118790>
- Bogdanović, T., Pleadin, J., Petričević, S., Brkljača, M., Listeš, I., & Listeš, E. (2021). Mikroplastika - potencijalni rizik za sigurnost hrane morskog podrijetla. *Veterinarska Stanica*, 53(3), 313–328. <https://doi.org/10.46419/vs.53.3.11>
- Böhmert, L., Stock, V., & Braeuning, A. (2019). Plausibility of microplastic uptake in a paper by Deng et al., Scientific reports 7:46687, 2017. *Archives of Toxicology*, 93(1), 217–218. <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2383-9>
- Cai, T., Tang, Z., Gu, T., Tong, K., Wang, X., Chen, H., Zhou, X., Long, Z., Hao, C., Chen, C., & Zeng, R. (2025). Microplastics in Drinking Water: A Review of Sources, Removal, Detection, Occurrence, and Potential Risks. In *Toxics* (Vol. 13, Issue 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/toxics13090782>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Uricchio, V. F. (2020). A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Chen, Q., Yin, D., Jia, Y., Schiwy, S., Legradi, J., Yang, S., & Hollert, H. (2017). Enhanced uptake of BPA in the presence of nanoplastics can lead to neurotoxic effects in adult zebrafish. *Science of The Total Environment*, 609, 1312–1321. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.07.144>

- Choudhary, D., Kurien, C., & Srivastava, A. K. (2020). *Microplastic Contamination and Life Cycle Assessment of Bottled Drinking Water* (pp. 41–48). https://doi.org/10.1007/978-981-32-9956-6_4
- Chu, X., Zheng, B., Li, Z., Cai, C., Peng, Z., Zhao, P., & Tian, Y. (2022). Occurrence and distribution of microplastics in water supply systems: In water and pipe scales. *Science of The Total Environment*, 803, 150004. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150004>
- Collard, F., Gilbert, B., Compère, P., Eppe, G., Das, K., Jauniaux, T., & Parmentier, E. (2017). Microplastics in livers of European anchovies (*Engraulis encrasicolus*, L.). *Environmental Pollution*, 229, 1000–1005. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.07.089>
- Colton, J. B., Burns, B. R., & Knapp, Frederick D. (1974). Plastic Particles in Surface Waters of the Northwestern Atlantic. *Science*, 185(4150), 491–497. <https://doi.org/10.1126/science.185.4150.491>
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human Consumption of Microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). 5-Microplastics, standardisation and spatial distribution. *Microplastic Pollutants*, 5, 115–122.
- Curren, E., Leaw, C. P., Lim, P. T., & Leong, S. C. Y. (2020). Evidence of Marine Microplastics in Commercially Harvested Seafood. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.562760>

- Daniel, D. B., Ashraf, P. M., Thomas, S. N., & Thomson, K. T. (2021). Microplastics in the edible tissues of shellfishes sold for human consumption. *Chemosphere*, 264, 128554. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128554>
- Deng, Y., Yan, Z., Shen, R., Huang, Y., Ren, H., & Zhang, Y. (2021). Enhanced reproductive toxicities induced by phthalates contaminated microplastics in male mice (*Mus musculus*). *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124644. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124644>
- Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., & Ren, H. (2017). Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Scientific Reports*, 7(1), 46687. <https://doi.org/10.1038/srep46687>
- Dessi, C., Okoffo, E. D., O'Brien, J. W., Gallen, M., Samanipour, S., Kaserzon, S., Rauert, C., Wang, X., & Thomas, K. V. (2021). Plastics contamination of store-bought rice. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125778. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125778>
- Diaz-Basantes, M. F., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2020). Microplastics in Honey, Beer, Milk and Refreshments in Ecuador as Emerging Contaminants. *Sustainability*, 12(14), 5514. <https://doi.org/10.3390/su12145514>
- Dowarah, K., Patchaiyappan, A., Thirunavukkarasu, C., Jayakumar, S., & Devipriya, S. P. (2020). Quantification of microplastics using Nile Red in two bivalve species *Perna viridis* and *Meretrix meretrix* from three estuaries in Pondicherry, India and microplastic uptake by local communities through bivalve diet. *Marine Pollution*

Bulletin, 153, 110982.
<https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2020.110982>

- Eker, F., Gungunes, A., Durmaz, S., Kisa, U., & Celik, Z. R. (2021). Nonfunctional adrenal incidentalomas may be related to bisphenol-A. *Endocrine*, 71(2), 459–466. <https://doi.org/10.1007/s12020-020-02502-2>
- Farady, S. E. (2019). Microplastics as a new, ubiquitous pollutant: Strategies to anticipate management and advise seafood consumers. *Marine Policy*, 104, 103–107. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2019.02.020>
- Ferraz, M., Bauer, A. L., Valiati, V. H., & Schulz, U. H. (2020). Microplastic Concentrations in Raw and Drinking Water in the Sinos River, Southern Brazil. *Water*, 12(11), 3115. <https://doi.org/10.3390/w12113115>
- Fu, Z., Chen, G., Wang, W., & Wang, J. (2020). Microplastic pollution research methodologies, abundance, characteristics and risk assessments for aquatic biota in China. *Environmental Pollution*, 266, 115098. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.115098>
- Green, D. S., Boots, B., Sigwart, J., Jiang, S., & Rocha, C. (2016). Effects of conventional and biodegradable microplastics on a marine ecosystem engineer (*Arenicola marina*) and sediment nutrient cycling. *Environmental Pollution*, 208, 426–434. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2015.10.010>
- Green, D. S., Kregting, L., Boots, B., Blockley, D. J., Brickle, P., da Costa, M., & Crowley, Q. (2018). A comparison of sampling methods for seawater microplastics and a first report of the microplastic litter in coastal waters of Ascension and Falkland Islands. *Marine Pollution*

Bulletin, 137, 695–701.
<https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2018.11.004>

- Guart, A., Bono-Blay, F., Borrell, A., & Lacorte, S. (2011). Migration of plasticizersphthalates, bisphenol A and alkylphenols from plastic containers and evaluation of risk. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 28(5), 676–685.
<https://doi.org/10.1080/19440049.2011.555845>
- Guo, X., Wang, L., Wang, X., Li, D., Wang, H., Xu, H., Liu, Y., Kang, R., Chen, Q., Zheng, L., Wu, S., Guo, Z., & Zhang, S. (2024). Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials*, 477, 135266.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2024.135266>
- He, B., Duodu, G. O., Rintoul, L., Ayoko, G. A., & Goonetilleke, A. (2020). Influence of microplastics on nutrients and metal concentrations in river sediments. *Environmental Pollution*, 263, 114490.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114490>
- He, S., Wei, Y., Yang, C., & He, Z. (2022). Interactions of microplastics and soil pollutants in soil-plant systems. *Environmental Pollution*, 315, 120357.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.120357>
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Hollóczki, O., & Gehrke, S. (2019). Nanoplastics can change the secondary structure of proteins. *Scientific Reports*, 9(1), 16013. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52495-w>

- Hossain, M. S., Rahman, M. S., Uddin, M. N., Sharifuzzaman, S. M., Chowdhury, S. R., Sarker, S., & Nawaz Chowdhury, M. S. (2020). RETRACTED: Microplastic contamination in Penaeid shrimp from the Northern Bay of Bengal. *Chemosphere*, 238, 124688. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.124688>
- Huang, X., Saha, S. C., Saha, G., Francis, I., & Luo, Z. (2024). Transport and deposition of microplastics and nanoplastics in the human respiratory tract. *Environmental Advances*, 16, 100525. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2024.100525>
- Iñiguez, M. E., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2017). Microplastics in Spanish Table Salt. *Scientific Reports*, 7(1), 8620. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x>
- Jaafar, N., Azfaralariff, A., Musa, S. M., Mohamed, M., Yusoff, A. H., & Lazim, A. M. (2021). Occurrence, distribution and characteristics of microplastics in gastrointestinal tract and gills of commercial marine fish from Malaysia. *Science of The Total Environment*, 799, 149457. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149457>
- Jang, F. H., Wong, C., Choo, J., Aun Sia, E. S., Mujahid, A., & Müller, M. (2022). Increased transfer of trace metals and *Vibrio* sp. from biodegradable microplastics to catfish *Clarias gariepinus*. *Environmental Pollution*, 298, 118850. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.118850>
- Jin, Y., Lu, L., Tu, W., Luo, T., & Fu, Z. (2019). Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice. *Science of The Total Environment*, 649, 308–317. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.353>

- Jinhui, S., Sudong, X., Yan, N., Xia, P., Jiahao, Q., & Yongjian, X. (2019). Effects of microplastics and attached heavy metals on growth, immunity, and heavy metal accumulation in the yellow seahorse, *Hippocampus kuda* Bleeker. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110510. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.110510>
- Junaid, M., Siddiqui, J. A., Sadaf, M., Liu, S., & Wang, J. (2022). Enrichment and dissemination of bacterial pathogens by microplastics in the aquatic environment. *Science of The Total Environment*, 830, 154720. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154720>
- Kadac-Czapska, K., Oško, J., Knez, E., & Grembecka, M. (2024). Microplastics and Oxidative Stress—Current Problems and Prospects. *Antioxidants*, 13(5), 579. <https://doi.org/10.3390/antiox13050579>
- Kannan, K., & Vimalkumar, K. (2021). A Review of Human Exposure to Microplastics and Insights Into Microplastics as Obesogens. *Frontiers in Endocrinology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.724989>
- Karapanagioti, H. K., Endo, S., Ogata, Y., & Takada, H. (2011). Diffuse pollution by persistent organic pollutants as measured in plastic pellets sampled from various beaches in Greece. *Marine Pollution Bulletin*, 62(2), 312–317. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2010.10.009>
- Karbalaeei, S., Hanachi, P., Walker, T. R., & Cole, M. (2018). Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), 36046–36063. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3508-7>

- Kim, J.-S., Lee, H.-J., Kim, S.-K., & Kim, H.-J. (2018). Global Pattern of Microplastics (MPs) in Commercial Food-Grade Salts: Sea Salt as an Indicator of Seawater MP Pollution. *Environmental Science & Technology*, 52(21), 12819–12828. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04180>
- Kirstein, I. V., Gomiero, A., & Vollertsen, J. (2021). Microplastic pollution in drinking water. *Current Opinion in Toxicology*, 28, 70–75. <https://doi.org/10.1016/J.COTOX.2021.09.003>
- Kirstein, I. V., Hensel, F., Gomiero, A., Iordachescu, L., Vianello, A., Wittgren, H. B., & Vollertsen, J. (2021). Drinking plastics? – Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by μ FTIR and Py-GCMS. *Water Research*, 188, 116519. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116519>
- Kuttralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? *Science of The Total Environment*, 714, 136823. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.136823>
- Lee, C. W., Hsu, L. F., Wu, I. L., Wang, Y. L., Chen, W. C., Liu, Y. J., Yang, L. T., Tan, C. L., Luo, Y. H., Wang, C. C., Chiu, H. W., Yang, T. C. K., Lin, Y. Y., Chang, H. A., Chiang, Y. C., Chen, C. H., Lee, M. H., Peng, K. T., & Huang, C. C. Y. (2022). Exposure to polystyrene microplastics impairs hippocampus-dependent learning and memory in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 430, 128431. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.128431>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022).

- Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2022.107199>
- LI, H., ZHU, L., MA, M., WU, H., AN, L., & YANG, Z. (2023). Occurrence of microplastics in commercially sold bottled water. *Science of The Total Environment*, 867, 161553.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.161553>
- Li, Q., Feng, Z., Zhang, T., Ma, C., & Shi, H. (2020). Microplastics in the commercial seaweed nori. *Journal of Hazardous Materials*, 388, 122060.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122060>
- Li, S., Ma, Y., Ye, S., Tang, S., Liang, N., Liang, Y., & Xiao, F. (2021). Polystyrene microplastics trigger hepatocyte apoptosis and abnormal glycolytic flux via ROS-driven calcium overload. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126025.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.126025>
- Li, Y., Wang, Z., & Guan, B. (2022). Separation and identification of nanoplastics in tap water. *Environmental Research*, 204, 112134.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2021.112134>
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(12), 2136–2140.
<https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2014). Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(9), 1574–1578.
<https://doi.org/10.1080/19440049.2014.945099>

- Lin, J., Cheng, Q., Kumar, A., Zhang, W., Yu, Z., Hui, D., Zhang, C., & Shan, S. (2025). Effect of degradable microplastics, biochar and their coexistence on soil organic matter decomposition: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 183, 118082. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2024.118082>
- Lin, W. H., Wang, H. Y., Kuo, J., & Lo, S. L. (2023). Adsorption and desorption characteristics of heavy metals onto conventional and biodegradable plastics. *Chemosphere*, 333, 138920. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138920>
- Liu, Q., Chen, Z., Chen, Y., Yang, F., Yao, W., & Xie, Y. (2021). Microplastics and Nanoplastics: Emerging Contaminants in Food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(36), 10450–10468. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04199>
- Liu, X., Yang, H., Yan, X., Xu, S., Fan, Y., Xu, H., Ma, Y., Hou, W., Javed, R., & Zhang, Y. (2022). Co-exposure of polystyrene microplastics and iron aggravates cognitive decline in aging mice via ferroptosis induction. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 233, 113342. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2022.113342>
- Liu, Y., Zhang, J. Di, Cai, C. Y., He, Y., Chen, L. Y., Xiong, X., Huang, H. J., Tao, S., & Liu, W. X. (2020). Occurrence and characteristics of microplastics in the Haihe River: An investigation of a seagoing river flowing through a megacity in northern China. *Environmental Pollution*, 262, 114261. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114261>
- Lu, L., Wan, Z., Luo, T., Fu, Z., & Jin, Y. (2018). Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and

- hepatic lipid metabolism disorder in mice. *Science of The Total Environment*, 631–632, 449–458. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.03.051>
- Makhdoumi, P., Amin, A. A., Karimi, H., Pirsaeheb, M., Kim, H., & Hossini, H. (2021). Occurrence of microplastic particles in the most popular Iranian bottled mineral water brands and an assessment of human exposure. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101708. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101708>
- Martinez-Tavera, E., Duarte-Moro, A. M., Sujitha, S. B., Rodriguez-Espinosa, P. F., Rosano-Ortega, G., & Expósito, N. (2021). Microplastics and metal burdens in freshwater Tilapia (*Oreochromis niloticus*) of a metropolitan reservoir in Central Mexico: Potential threats for human health. *Chemosphere*, 266, 128968. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128968>
- Meng, J., Zhang, L., Zhao, S., Zhai, Q., & Zhang, Q. (2025). Micro- and nano-plastic contamination in foods and potential risk to human health. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 303). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119021>
- Möller, J. N., Löder, M. G. J., & Laforsch, C. (2020). Finding Microplastics in Soils: A Review of Analytical Methods. *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2078–2090. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04618>
- Mukotaka, A., Kataoka, T., & Nihei, Y. (2021). Rapid analytical method for characterization and quantification of microplastics in tap water using a Fourier-transform infrared microscope. *Science of The Total Environment*, 790, 148231. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148231>

- Nalbone, L., Cincotta, F., Giarratana, F., Ziino, G., & Panebianco, A. (2021). Microplastics in fresh and processed mussels sampled from fish shops and large retail chains in Italy. *Food Control*, 125, 108003. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108003>
- Nelms, S. E., Galloway, T. S., Godley, B. J., Jarvis, D. S., & Lindeque, P. K. (2018). Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environmental Pollution*, 238, 999–1007. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2018.02.016>
- Nizamali, J., Mintenig, S. M., & Koelmans, A. A. (2023). Assessing microplastic characteristics in bottled drinking water and air deposition samples using laser direct infrared imaging. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129942. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.129942>
- Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., & Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*, 141, 307–316. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2018.05.027>
- Özsoy, S., Gündoğdu, S., Sezigen, S., Tasalp, E., Ikiz, D. A., & Kideys, A. E. (2024). Presence of microplastics in human stomachs. *Forensic Science International*, 364, 112246. <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2024.112246>
- Pottinger, A. S., Geyer, R., Biyani, N., Martinez, C. C., Nathan, N., Morse, M. R., Liu, C., Hu, S., de Bruyn, M., Boettiger, C., Baker, E., & McCauley, D. J. (2024). Pathways to reduce global plastic waste mismanagement and greenhouse gas emissions by 2050.

- Science*, 386(6726), 1168–1173.
<https://doi.org/10.1126/science.adr3837>
- Pratesi, C. B., A. L. Santos Almeida, M. A., Cutrim Paz, G. S., Ramos Teotonio, M. H., Gandolfi, L., Pratesi, R., Hecht, M., & Zandonadi, R. P. (2021). Presence and Quantification of Microplastic in Urban Tap Water: A Pre-Screening in Brasilia, Brazil. *Sustainability*, 13(11), 6404. <https://doi.org/10.3390/su13116404>
- Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R. H. S. (2020). The plastic brain: neurotoxicity of micro- and nanoplastics. *Particle and Fibre Toxicology*, 17(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00358-y>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.106274>
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G., & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *Science of The Total Environment*, 757, 143872. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143872>
- Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytologist*, 223(3), 1066–1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>
- Saelee, P., Wongsoonthornchai, M., & Phasukphan, N. (2021). The contamination of microplastics in mussel (*Mytilus*

- edulis), and oyster (*Crassostrea gigas*): a case study from a fish market, Chonburi province. *Burapha Science Journal*, 1726–1744.
- Sarkar, D. J., Das Sarkar, S., Das, B. K., Sahoo, B. K., Das, A., Nag, S. K., Manna, R. K., Behera, B. K., & Samanta, S. (2021). Occurrence, fate and removal of microplastics as heavy metal vector in natural wastewater treatment wetland system. *Water Research*, 192, 116853. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.116853>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H. U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154–162. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2017.11.011>
- Semmouri, I., Vercauteren, M., Van Acker, E., Pequeur, E., Asselman, J., & Janssen, C. (2023). Distribution of microplastics in freshwater systems in an urbanized region: A case study in Flanders (Belgium). *Science of The Total Environment*, 872, 162192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162192>
- Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., & Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124004. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124004>
- Shen, M., Zeng, Z., Wen, X., Ren, X., Zeng, G., Zhang, Y., & Xiao, R. (2021). Presence of microplastics in drinking water from freshwater sources: the investigation in Changsha, China. *Environmental Science and Pollution*

Research, 28(31), 42313–42324.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-13769-x>

- Shruti, V. C., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Elizalde-Martínez, I. (2022). Free, but not microplastic-free, drinking water from outdoor refill kiosks: A challenge and a wake-up call for urban management. *Environmental Pollution*, 309, 119800. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119800>
- Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Kutralam-Muniasamy, G. (2020). First study of its kind on the microplastic contamination of soft drinks, cold tea and energy drinks - Future research and environmental considerations. *Science of The Total Environment*, 726, 138580. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138580>
- Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., & Kutralam-Muniasamy, G. (2020). Metro station free drinking water fountain- A potential “microplastics hotspot” for human consumption. *Environmental Pollution*, 261, 114227. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114227>
- Singh, T. (2021). Generation of microplastics from the opening and closing of disposable plastic water bottles. *Journal of Water and Health*, 19(3), 488–498. <https://doi.org/10.2166/wh.2021.025>
- Taghipour, H., Ghayebzadeh, M., Ganji, F., Mousavi, S., & Azizi, N. (2023). Tracking microplastics contamination in drinking water in Zahedan, Iran: From source to consumption taps. *Science of The Total Environment*, 872, 162121. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.162121>

- Talsness, C. E., Andrade, A. J. M., Kuriyama, S. N., Taylor, J. A., & vom Saal, F. S. (2009). Components of plastic: experimental studies in animals and relevance for human health. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2079–2096. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0281>
- Teng, J., Wang, Q., Ran, W., Wu, D., Liu, Y., Sun, S., Liu, H., Cao, R., & Zhao, J. (2019). Microplastic in cultured oysters from different coastal areas of China. *Science of The Total Environment*, 653, 1282–1292. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.057>
- Teng, M., Zhao, X., Wang, C., Wang, C., White, J. C., Zhao, W., Zhou, L., Duan, M., & Wu, F. (2022). Polystyrene Nanoplastics Toxicity to Zebrafish: Dysregulation of the Brain–Intestine–Microbiota Axis. *ACS Nano*, 16(5), 8190–8204. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c01872>
- Tong, H., Jiang, Q., Hu, X., & Zhong, X. (2020). Occurrence and identification of microplastics in tap water from China. *Chemosphere*, 252, 126493. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126493>
- Unuofin, J. O., & Igwaran, A. (2023). Microplastics in seafood: Implications for food security, safety, and human health. *Journal of Sea Research*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102410>
- Varó, I., Perini, A., Torreblanca, A., Garcia, Y., Bergami, E., Vannuccini, M. L., & Corsi, I. (2019). Time-dependent effects of polystyrene nanoparticles in brine shrimp *Artemia franciscana* at physiological, biochemical and molecular levels. *Science of The Total Environment*, 675, 570–580. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.157>

- Vital, S. A., Cardoso, C., Avio, C., Pittura, L., Regoli, F., & Bebianno, M. J. (2021). Do microplastic contaminated seafood consumption pose a potential risk to human health? *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112769. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112769>
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, 254, 126791. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126791>
- Weber, F., Kerpen, J., Wolff, S., Langer, R., & Eschweiler, V. (2021). Investigation of microplastics contamination in drinking water of a German city. *Science of The Total Environment*, 755, 143421. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143421>
- Weisser, J., Beer, I., Hufnagl, B., Hofmann, T., Lohninger, H., Ivleva, N. P., & Glas, K. (2021). From the Well to the Bottle: Identifying Sources of Microplastics in Mineral Water. *Water*, 13(6), 841. <https://doi.org/10.3390/w13060841>
- WHO. (2019). *Microplastics in drinking-water*.
- Wu, M., Yang, C., Du, C., & Liu, H. (2020). Microplastics in waters and soils: Occurrence, analytical methods and ecotoxicological effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, 110910. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.110910>
- Wu, P., Huang, J., Zheng, Y., Yang, Y., Zhang, Y., He, F., Chen, H., Quan, G., Yan, J., Li, T., & Gao, B. (2019). Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,

- 184, 109612.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>
- Xu, J., Tang, M., & Xu, X. (2025). Microplastics in food: Sources, distribution, health impacts, and regulation. In *Journal of Food Composition and Analysis* (Vol. 140). Academic Press Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107274>
- Yan, Z., Liu, Y., Zhang, T., Zhang, F., Ren, H., & Zhang, Y. (2022). Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. *Environmental Science & Technology*, 56(1), 414–421.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924>
- Yang, D., Shi, H., Li, L., Li, J., Jabeen, K., & Kolandhasamy, P. (2015). Microplastic Pollution in Table Salts from China. *Environmental Science & Technology*, 49(22), 13622–13627. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03163>
- Yang, L., Kang, S., Luo, X., & Wang, Z. (2024). Microplastics in drinking water: A review on methods, occurrence, sources, and potential risks assessment. In *Environmental Pollution* (Vol. 348). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123857>
- Yang, W., Li, Y., & Boraschi, D. (2023). Association between Microorganisms and Microplastics: How Does It Change the Host–Pathogen Interaction and Subsequent Immune Response? *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4), 4065.
<https://doi.org/10.3390/ijms24044065>
- Yao, C., Liu, X., Wang, H., Sun, X., Qian, Q., & Zhou, J. (2021). Occurrence of Microplastics in Fish and Shrimp Feeds. *Bulletin of Environmental Contamination and*

- Toxicology*, 107(4), 684–692.
<https://doi.org/10.1007/s00128-021-03328-y>
- Yong, C., Valiyaveetil, S., & Tang, B. (2020). Toxicity of Microplastics and Nanoplastics in Mammalian Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1509.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17051509>
- Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “Plastisphere”: Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>
- Zhang, F., Lee, M. H., Huang, Y., Keller, A. A., Majumdar, S., Cervantes-Avilés, P., Tang, X., & Yin, S. (2019). Effective water disinfection using magnetic barium phosphate nanoflakes loaded with Ag nanoparticles. *Journal of Cleaner Production*, 218, 173–182.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.232>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L., & Kannan, K. (2021). Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(11), 989–994. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.116554>
- Zhang, M., Li, J., Ding, H., Ding, J., Jiang, F., Ding, N. X., & Sun, C. (2020). Distribution Characteristics and Influencing Factors of Microplastics in Urban Tap

- Water and Water Sources in Qingdao, China. *Analytical Letters*, 53(8), 1312–1327. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1705476>
- Zhang, Q., Xu, E. G., Li, J., Chen, Q., Ma, L., Zeng, E. Y., & Shi, H. (2020). A Review of Microplastics in Table Salt, Drinking Water, and Air: Direct Human Exposure. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 3740–3751. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04535>
- Zhang, X., Li, Y., Ouyang, D., Lei, J., Tan, Q., Xie, L., Li, Z., Liu, T., Xiao, Y., Farooq, T. H., Wu, X., Chen, L., & Yan, W. (2021). Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126288. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.126288>
- Zhang, Y., & Goss, G. G. (2021). The “Trojan Horse” effect of nanoplastics: potentiation of polycyclic aromatic hydrocarbon uptake in rainbow trout and the mitigating effects of natural organic matter. *Environmental Science: Nano*, 8(12), 3685–3698. <https://doi.org/10.1039/D1EN00738F>
- Zhao, S., Wang, T., Zhu, L., Xu, P., Wang, X., Gao, L., & Li, D. (2019). Analysis of suspended microplastics in the Changjiang Estuary: Implications for riverine plastic load to the ocean. *Water Research*, 161, 560–569. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.06.019>
- Zhao, S., Ward, J. E., Danley, M., & Mincer, T. J. (2018). Field-Based Evidence for Microplastic in Marine Aggregates and Mussels: Implications for Trophic Transfer. *Environmental Science & Technology*, 52(19), 11038–11048. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03467>

- Zhou, X. jun, Wang, J., Li, H. yan, Zhang, H. min, Hua-Jiang, & Zhang, D. L. (2021). Microplastic pollution of bottled water in China. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101884. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101884>
- Zhou, X. X., Liu, R., Hao, L. T., & Liu, J. F. (2021). Identification of polystyrene nanoplastics using surface enhanced Raman spectroscopy. *Talanta*, 221, 121552. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2020.121552>
- Zuccarello, P., Ferrante, M., Cristaldi, A., Copat, C., Grasso, A., Sangregorio, D., Fiore, M., & Oliveri Conti, G. (2019). Exposure to microplastics (<10 µm) associated to plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study. *Water Research*, 157, 365–371. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.03.091>

GIDALARDAN MİKROPLASTİK ALIMINI KONTROL ETME YOLLARI

Hilal ARSLAN BAYRAKCI¹

1. GİRİŞ

MP'ler doğada parçalanmayan ve her yerde bulunan maddelerdir; gıda üretimi ve işlenmesinin çeşitli aşamalarında gıdalara karışarak, gıda zincirinde dolaşımları sırasında insan sağlığı için risk oluştururlar. Bu nedenle, gıdalardaki MP'leri kontrol altına alma yöntemleri son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir (Xu vd., 2025).

2. ÜRETİM VE İŞLEME AŞAMALARINDA KONTROL

MP'ler gıdaya su, toprak ve gıda işleme yoluyla girebilir. Bu nedenle, gıdalardaki MP konsantrasyonlarını azaltmak için öncelikle okyanuslardaki, yüzey sularındaki, yeraltı sularındaki ve topraktaki MP konsantrasyonlarını düzenlemek zorunludur. İlgili önlemler arasında gıda üretim alanlarının yakınındaki okyanusların, nehirlerin ve toprağın denetlenmesi, kontrol edilmesi ve arındırılması yer alabilir. Ancak, bu hedefe ulaşmak basit olmayacaktır ve gıda üretim bölgelerindeki hükümetlerin politikalar uygulamasını ve uygun önlemleri yürürlüğe koymasını gerektirecektir. Dahası, çevredeki plastik parçacık konsantrasyonu endüstriyel kaynaklardan uzaklaştıkça azalma eğilimindedir (Talbot & Chang, 2022). Bu nedenle, deniz

¹ Dr. Öğr. Üyesi Hilal Arslan Bayrakçı, Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0003-0069-4164

ürünleri çiftçiliği, mahsul yetiştirme ve gıda işleme işletmeleri endüstriyel ve yoğun nüfuslu bölgelerden kaçınmalıdır. Dahası, çoğu işlenmiş gıdada, MP'ler depolama ve işleme sırasında gıdaya girer. Gerçekten de plastik bir kesme tahtası üzerindeki her kesim mm başına yaklaşık 100-300 MP üretir (Luo vd., 2022). Bu nedenle gıda üreticileri, işleme sırasında metal kaplar, tezgahlar, aletler ve konveyör bantları kullanarak plastik kaplarla teması önlemeye çalışmalıdır (Xu vd., 2025).

3. AMBALAJ MALZEMELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Neredeyse tüm gıdalar, gıda kontaminasyonunu ve dış çevreden kaynaklanan hasarı önlemek için bir tür ambalaj içerir (Wang & Wang, 2017). Plastik gıda ambalajları, şu anda piyasada bulunan gıda ambalajlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Dahası, gıda ambalajları tüm plastik atıkların yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır (Banu vd., 2023). Gıda ile temas eden plastik gıda ambalajlarından MP'lerin göçü, gıdalardaki MP'lerin ana kaynaklarından biridir. Bu nedenle, plastik gıda ambalajlarının cam, metal ve kâğıt gibi malzemelerle değiştirilmesiyle gıdalardaki MP konsantrasyonları azaltılabilir. MP göçüne ek olarak, plastik gıda ambalajlarına polimer özelliklerini iyileştirmek için eklenen plastikleştiriciler, yağlayıcılar ve renklendiriciler gibi çeşitli kimyasal katkı maddeleri de gıda ile doğrudan temas yoluyla göç eder (Hahladakis vd., 2018). Bu nedenle, üreticiler gıda ambalajı üretimi sırasında kimyasal katkı maddelerinin kullanımını mümkün olduğunca azaltmalıdır. Ancak bu, ilgili hükümetlerin ve kuruluşların gıda ambalajlarında kullanılan kimyasal katkı maddelerini düzenlemesini gerektirebilir.

Son yıllarda, çevre dostu ve toksik olmayan özellikleri nedeniyle biyolojik olarak parçalanabilir gıda ambalajlarına olan

ilgi artmaktadır. Doğal mikroorganizmalar (bakteri, mantar veya alg gibi) tarafından su, karbondioksit ve organik maddeye parçalanabilen biyolojik olarak parçalanabilir polimerler (Prata vd., 2019), gıda ambalajlarının hazırlanmasında da kullanılabilir. Ancak, bu şüphesiz gıda maliyetini artıracaktır. Dahası, biyolojik olarak parçalanabilir polimer ambalajlar, bazı ekosistemlerdeki bozunma koşullarının eksikliği nedeniyle biyolojik olarak parçalanabilir MP'ler üretebilir. Dahası, biyolojik olarak parçalanabilir MP'lerin, biyolojik olarak parçalanmayan MP'lere kıyasla vücutta yutulma ve birikme olasılığı daha yüksektir ve bu da bozulmuş kemik gelişimi ve oksidatif stres gibi sağlık tehlikelerine neden olur (Malafeev vd., 2023).

Ek olarak, gıdalardaki MP göçü, örneğin kimyasal katkı maddeleri içermeyen veya gıdayla temas eden yüzeylerde metal kaplama işlemleri olan yeni plastik gıda ambalajları geliştirilerek en aza indirilebilir. Önceki çalışmalar, polipropilen bebek biberonlarından salınan MP miktarının sıcaklıkla birlikte kademeli olarak arttığını göstermiştir (Li vd., 2020), bu nedenle taşıma sırasında yüksek sıcaklıklara maruziyetten kaçınılmalıdır. Oßmann vd. (2018), tek kullanımlık ve yeniden kullanılabilir plastik şişelerdeki MP'leri ölçmüş ve yeniden kullanılabilir şişelerde daha fazla plastik parçacığı bulunduğunu bulmuştur. Bu nedenle, gıda üreticileri yeniden kullanılabilir plastik ambalaj veya kapların kullanımından mümkün olduğunca kaçınılmalıdır.

Plastiğin mantıksız kullanımı farklı organlarda birikmesine ve bunun sonucunda insan sağlığını etkileyen kronik inflamatuvar reaksiyonların oluşmasına neden olmuştur. Bu durum araştırmacıları biyolojik olarak parçalanabilen, nişastalar, proteinler, deniz yosunu ve diğer biyokütlelerden oluşan biyolojik bazlı malzemeler geliştirmeye yöneltmiştir. Bu malzemeler işlemiden sonra hem çevre koruma hem de kararlı özellikler, gıda güvenliği ve diğer yeni malzeme avantajlarını oluşturabilir. Polisakkarit bazlı ambalajlar iyi bir oksijen bariyerine ve yapısal

stabiliteye sahiptir (Sarkar vd., 2023), mükemmel mekanik özellikleri ve bariyer özellikleri nedeniyle protein bazlı ambalajlar ilgi çekmiştir (Khin vd., 2024), lipid bazlı malzemeler su kaybını azaltabilir, parlak bir görünüm sağlayabilir (Mohamed vd., 2020), hidrofobik ve hidrofilik bileşenleri birleştirerek kompozit film ambalajları, tek bir bileşenden daha üstün bir özellik sağlar, en yaygın kullanılanıdır. Özellikle çok seviyeli ambalaj ihtiyaçları için uygundur. Gelecekte, nanoteknoloji ambalajın yapısını daha iyi kontrol ederek daha iyi sonuçlar elde etmek için kullanılabilir (Herrera A. & Gonzalez de Mejia, 2021).

4. TÜKETİCİLERİN BİLİNÇLENDİRİLMESİ

Daha önce açıklandığı gibi, plastik içecek şişelerinin ve gıda kutularının uzun vadeli yeniden kullanımı önemli MP sızmasına yol açabilir (Muhib vd., 2023). Ayrıca, Moreno-Gordaliza vd., normal kullanım ve mikrodalga ısıtma koşulları altında polipropilen ve silikon gıda kaplarından MP salım davranışını inceledi ve geleneksel ve mikrodalga ısıtma koşulları altında farklı formlarda mikron boyutunda plastik parçacıkların salındığını gösterdi (Moreno-Gordaliza vd., 2023). Bu nedenle, tüketicilerin gıdalardaki MP alımını azaltmalarının en etkili yöntemi, günlük gıda tüketimi için plastik gıda ambalaj poşetlerinin, şişelerinin ve kaplarının yeniden kullanımından kaçınmak ve bunun yerine mümkün olduğunca gıdalar için cam veya metal kaplar kullanmaktır. Tüketicilerin gıdalardaki MP'lerin tehlikeleri hakkında farkındalıklarını artırmalı ve plastik veya aşırı plastik ambalaj (örneğin çoklu ambalaj) içermeyen gıda satın almalıdır. Geri dönüştürülmüş plastik atık da gıdalardaki MP'lerin önemli bir kaynağıdır (Okeke vd., 2022). Bu nedenle, günlük yaşamda plastik ürün satın alma ve tüketiminin azaltılması, gıdalardaki MP konsantrasyonlarını dolaylı olarak azaltabilir. Özellikle, yenilebilir hayvanlardaki MP'ler genellikle

sindirim sisteminde (yani gastrointestinal sistemde) yoğunlaşır. Dolayısıyla, yenilebilir hayvanların tüketim sırasında gastrointestinal sisteminin çıkarılması, MP alımını önemli ölçüde azaltabilir (Savoca vd., 2021).

MP'ler insan kanında ve dışkısında da bulunmuştur ve yakın tarihli bir çalışma insan balgamında 21 tip MP tanımlamıştır; bu, inhalasyonun MP'lerin insan vücuduna girdiği potansiyel bir yol olduğunu göstermektedir (Huang vd., 2022). Solunum yollarındaki MP tiplerinin sayısı, sigara içme ve invaziv incelemeler gibi yaşam tarzı alışkanlıklarıyla da ilişkili olabilir (Huang vd., 2022). Çevresel MP maruziyetinin potansiyel sağlık riskleri, sigara içme, plastik şişelerde paketlenmiş içecekler içme ve plastik pipetlerle içme gibi insan sağlığına zararlı beslenme alışkanlıklarının değiştirilmesiyle de bir dereceye kadar azaltılabilir. Önceki raporlara göre, insan vücudundaki MP'ler esas olarak dışkı yoluyla atılır. İdrarda yalnızca küçük molekül ağırlıklı ve hidrofilik maddeler bulunduğundan, MP'lerin idrar yoluyla atılma olasılığı düşüktür. Ancak, parçalanabilir plastiklerin biyolojik olarak parçalanması sırasında üretilen monomerler ve katkı maddeleri idrar yoluyla atılabilir (Prata, 2023). Bu nedenle, yeterli su alımının sağlanması, plastik bozunması sırasında üretilen monomerlerin ve katkı maddelerinin atılımını artırabilir.

Yu vd. (2024), yayımladıkları çalışmada, merkezi arıttımdan kaçabilen MP'lerin içme suyu yoluyla insan maruziyetine katkısını azaltmak için ev tipi kaynatmanın potansiyelini deneysel olarak ortaya koymuştur: Araştırmacılar, musluk suyunda kaynatma sırasında özellikle sertlik ve alkaliniteye bağlı CaCO_3 (kireçtaşı) “incrustant” oluşumunun MP'ler üzerinde çekirdeklenerek parçacıkları kapsüllediğini ve CaCO_3 ile birlikte çöktürdüğünü göstermiş; sert sularda (>120 mg/L CaCO_3) 0,1–150 μm boyut aralığındaki MP'lerin en az %80'inin uzaklaştırılabildiğini raporlamıştır. Çalışmada

sıcaklığın artmasıyla CaCO_3 çekirdeklenmesinin hızlandığı ve MP'lerin bu oluşan mineral faz içinde agregasyon/kapsüllenme yoluyla sudan ayrıldığı vurgulanmış; ayrıca farklı su sertliği senaryolarıyla yapılan maruziyet tahminleri, kaynatılmış su tüketimiyle günlük MP alımının musluk suyuna kıyasla yaklaşık 2–5 kat azalabileceğini öne sürmüştür (Yu vd., 2024).

Hussain vd. (2023) yayımladıkları çalışmada, plastik gıda kapları ve yeniden kullanılabilir poşetlerden farklı kullanım koşullarında mikroplastik/nanoplastik salınımını gıda simülanlarıyla incelemiş ve mikrodalga ısıtmanın (3 dk) diğer senaryolara kıyasla salımı en fazla artırdığını göstermiştir. Bazı örneklerde 1 cm^2 plastik yüzeyden $4,22 \times 10^6$ mikroplastik ve $2,11 \times 10^9$ nanoplastik salınabildiği raporlanmış; ayrıca uzun süreli depolama koşullarının da (aylar düzeyinde) parçacık geçişine katkı verebildiği belirtilmiştir. Çalışma, özellikle ısıtma senaryolarında maruziyetin artabileceğine işaret ederek, plastik kaplarda ısıtmanın sınırlandırılmasının maruziyet azaltımı açısından rasyonel bir önlem olduğunu desteklemektedir (Hussain vd., 2023).

Yadav vd. (2023) yayımladıkları çalışmada, gıda hazırlığında yaygın kullanılan plastik kesme tahtalarının doğrama sırasında gıdaya mikroplastik aktarımı için “gözden kaçan” ancak nicel olarak anlamlı bir kaynak olabileceğini göstermiştir. Araştırmada polietilen (PE) ve polipropilen (PP) kesme tahtaları ile farklı doğrama senaryoları karşılaştırılmış; PP kesme tahtalarının PE'ye kıyasla saldıgı mikroplastiklerin kütle ve sayısının daha yüksek olduğu (kütlerde %5–60, sayıda %14–71 artış) raporlanmıştır. Yazarlar ayrıca yıllık kişi başı maruziyetin milyonlar düzeyinde parçacığa ulaşabileceğini (PE için 14,5–71,9 milyon/yıl; PP için 79,4 milyon/yıl) tahmin etmiş; bu bulgular mutfak ekipmanı seçiminin maruziyet azaltımında dikkate alınması gereken bir kontrol noktası olabileceğine işaret etmiştir (Yadav vd., 2023).

Dessì vd. (2021) yayımladıkları çalışmada, perakendede satılan pirinç örneklerinde polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polietilen tereftalatın (PET) nicel olarak saptanabildiğini ve PE'nin örneklerin büyük çoğunluğunda (yaklaşık %95) en sık görülen polimer olduğunu raporlamıştır. Çalışmada pirinç yıkama/durulama işleminin toplam plastik kontaminasyonunu anlamlı biçimde azalttığı; buna karşılık instant/ön pişirilmiş pirinçte plastik düzeylerinin çiğ pirince göre yaklaşık dört kat daha yüksek olduğu ve endüstriyel işlemin kontaminasyonu artırabileceği vurgulanmıştır. Yazarlar ayrıca bir porsiyon (100 g) için plastik alımını yıkama yapılmadığında ~3,7 mg, yıkama sonrası ise ~2,8 mg olarak tahmin ederek, basit bir ön işlemin maruziyeti azaltmada pratik bir kontrol noktası olabileceğine işaret etmiştir (Dessì vd., 2021).

Sol vd. (2023) yayımladıkları çalışmada, ev tipi bulaşık yıkamanın MP emisyonuna katkısını deneysel olarak değerlendirerek süre ve sıcaklığın salımı belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Bulaşık makinesi boş çalıştırıldığında kısa “pre-wash” programında (15 dk, oda sıcaklığı) 207–427 MP/yük (≈ 3 L) salınırken, “intensive” programda (164 dk, 70 °C) değer 1025–1370 MP/yük (≈ 15 L) aralığına yükselmiştir. Ayrıca bir polipropilen (PP) saklama kabının yıkanması toplam MP sayısını ek olarak 14 ± 3 ve 166 ± 12 MP artırmış; deterjan kullanımı ise makine içi aksesuar kaynaklı salımı %35–54 yükseltirken, saklama kaplarından ek bir artış gözlenmemiştir. Bulgular, evsel bulaşık yıkamanın hem çevresel mikroplastik yüküne katkı verebileceğini hem de plastik materyallerin kullanım ömrü boyunca aşınma ile parçacık üretimi açısından dikkate değer bir kaynak olabileceğini ortaya koymaktadır (Sol vd., 2023).

5. SONUÇ

MP'ler çevreye yaygın bir şekilde sızmış ve her yerde varlıklarını sergilemiştir. Küresel plastik üretiminin artmasıyla birlikte, MP'lerin neden olduğu kirliliğin artması ve çevresel ekosistemler için potansiyel tehditler oluşturmaları beklenmektedir. Gıda zincirinin farklı aşamalarında ve gıdalarda mikroplastiklerin varlığına dair veriler artsa da bunlar hala yetersizdir.

Gıda zincirindeki ve çevredeki mikroplastik yükünü azaltmak için atılacak iyi bir adım, birincil mikroplastiklerin kullanımını ve çevreye salınımını düzenleyen mevzuatın yürürlüğe konması olacaktır.

Gıdalardaki mikroplastiklerin olası olumsuz etkilerini azaltmak için iyi bir araç, risk analizi ve ardından yüksek mikroplastik içeriğine sahip yüksek riskli gıdalar için beslenme önerilerinin sunulması olacaktır. Mikroplastik kirliliği sorununu azaltmak, çevrede bozunmaları için yeni teknolojiler gerektirmektedir. Ayrıca, mikroplastikler ve daha iyi atık yönetimi konusunda kamuoyunun farkındalığını artırmak da çok önemlidir.

Çevre ve gıdalardaki tek kullanımlık plastik ürünler ve uzun ömürlü plastik atıklar, aşınma, hava koşulları ve çeşitli fizikokimyasal yöntemlerle yavaş yavaş MP'lere ayrışır ve bunlar gıdalardaki ve doğal çevredeki MP'lerin ana kaynaklarıdır. 2008-2013 yılları kadar erken bir dönemde Avrupa Birliği, Çin ve ABD sırasıyla doğal çevre ve insan yaşam ortamı üzerindeki plastik kirliliğinin olumsuz etkilerini sınırlamak için ilk kez önerilen "plastik kısıtlama politikası"nı ortaya koydu. Çin, ultra ince plastik poşetlerin üretimini ve kullanımını kısıtlamak için ilk olarak 2008 yılında "Ultra İnce Plastik Poşetlerin Üretimi, Satışı ve Kullanımının Yasaklanması Hakkında Bildiri"yi önerdi ve 2020 yılında "Plastik Kirliliğinin Kontrolü Eylem Planı"nı

yayımladı (Zhang vd., 2018). Çin'in politikası, özellikle gıda, içecek ve perakende sektörlerinde plastik ürünlere kapsamlı kısıtlamalar getiriyor ve tek kullanımlık plastik ürünleri aşamalı olarak kullanımdan kaldırmayı öneriyor. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki en eski "plastik kısıtlamaları", Kaliforniya eyaletinin plastik poşet kullanımını sınırlamak için tartıştığı ve harekete geçtiği 2007 yılına dayanmaktadır (Adler & Wells, 2023). AB ise, 2013 yılında plastik kirliliğini azaltmaya yönelik önlemler hakkında araştırma ve tartışmaya başlamış ve 2018 yılında plastik atık yönetimi ve çevresel etkileri ele almak ve plastikler için döngüsel bir ekonomiyi teşvik etmek amacıyla bir "Plastik Stratejisi" önermiştir; 2019 yılında, özellikle denizlerdeki plastik çöpleri olmak üzere plastik kirliliğini azaltmayı amaçlayan "Tek Kullanımlık Plastikler Direktifi"ni (Direktif (AB) 2019/904) resmen kabul etmiştir (Beghetto vd., 2023). Avrupa Birliği, 2013 yılında plastik kirliliğini azaltmaya yönelik önlemleri incelemeye ve tartışmaya başlamış ve 2018 yılında plastik atık yönetimi ve çevresel etkileri ele almak ve plastik döngüsel ekonomisini teşvik etmek amacıyla "Plastik Stratejisi"ni ortaya koymuştur; 2019 yılında, özellikle denizlerdeki plastik atıklar olmak üzere plastik kirliliğini azaltmayı amaçlayan "Tek Kullanımlık Plastikler Direktifi"ni (Direktif (AB) 2019/904) resmen kabul etti. Asya bölgesinde, Hindistan hükümeti de 2019'da 2022 yılına kadar tek kullanımlık plastik ürünlerin üretimini, satışını ve kullanımını tamamen yasaklayacağını duyurarak, Asya bölgesinde net bir hedefe sahip ilk ülke oldu. Birleşik Krallık, Güney Kore ve Kanada gibi diğer ülkeler de 2000'lerin sonu ve 2010'ların başında birbiri ardına plastik kısıtlamaları veya ilgili politikalar uygulamaya başladı (Hao & Jiang, 2023; Macintosh vd., 2020).

Bilim insanları MP'lerin yayılmasını ve insan sağlığına yönelik tehlikeleri fark ettikçe, plastiklerle ilgili kısıtlayıcı yasalar ve düzenlemeler MP'leri de kapsayacak şekilde kademeli

olarak genişletildi (Yang vd., 2024). Ülkeler arasında plastik ve MP'lerin düzenlenmesinde hala farklılıklar olsa da ortak payda, hepsinin plastik kirliliğinin, özellikle MP kirliliğinin çevre ve gıda güvenliği için oluşturduğu potansiyel tehdidin farkında olmalarıdır. Gelecekte, daha fazla bilimsel araştırma yürütüldükçe, daha fazla ülke ve bölge, özellikle gıda ambalajlarında ve temas malzemelerinde mikroplastik içeriği sınırları için MP'ler için özel düzenleyici standartlar getirecektir.

KAYNAKÇA

- Adler, R. W., & Wells, C. E. (2023). Plastics and the Limits of US Environmental Law. *Harvard Environmental Law Review*, 47(1).
- Banu, S., B, U., & P, R. (2023). Mastalgia and associated breast diseases in a tertiary care center, Tamil Nadu: A cross-sectional study. *National Journal of Physiology, Pharmacy and Pharmacology*, 13(11), 1. <https://doi.org/10.5455/njppp.2023.13.03121202315032023>
- Beghetto, V., Gatto, V., Samiolo, R., Scolaro, C., Brahimi, S., Facchin, M., & Visco, A. (2023). Plastics today: Key challenges and EU strategies towards carbon neutrality: A review. *Environmental Pollution*, 334, 122102. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2023.122102>
- Dessi, C., Okoffo, E. D., O'Brien, J. W., Gallen, M., Samanipour, S., Kaserzon, S., Rauert, C., Wang, X., & Thomas, K. V. (2021). Plastics contamination of store-bought rice. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125778. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125778>
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179-199. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2017.10.014>
- Hao, H., & Jiang, C. (2023). The path of transboundary marine plastic waste management in China, Japan, and South Korea from the perspective of the blue economy. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1075667>

- Herrera A., C., & Gonzalez de Mejia, E. (2021). Feasibility of commercial breadmaking using chickpea as an ingredient: Functional properties and potential health benefits. *Journal of Food Science*, 86(6), 2208-2224. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15759>
- Huang, S., Huang, X., Bi, R., Guo, Q., Yu, X., Zeng, Q., Huang, Z., Liu, T., Wu, H., Chen, Y., Xu, J., Wu, Y., & Guo, P. (2022). Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environmental Science & Technology*, 56(4), 2476-2486. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>
- Hussain, K. A., Romanova, S., Okur, I., Zhang, D., Kuebler, J., Huang, X., Wang, B., Fernandez-Ballester, L., Lu, Y., Schubert, M., & Li, Y. (2023). Assessing the Release of Microplastics and Nanoplastics from Plastic Containers and Reusable Food Pouches: Implications for Human Health. *Environmental Science & Technology*, 57(26), 9782-9792. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01942>
- Khin, M. N., Ahammed, S., Kamal, M. M., Saqib, M. N., Liu, F., & Zhong, F. (2024). Investigating next-generation edible packaging: Protein-based films and coatings for delivering active compounds. *Food Hydrocolloids for Health*, 6, 100182. <https://doi.org/10.1016/J.FHFH.2024.100182>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L., Xiao, L., Kehoe, D. K., Gun'ko, Y. K., Boland, J. J., & Wang, J. J. (2020). Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nature Food*, 1(11), 746-754. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Luo, Y., Chuah, C., Amin, M. Al, Khoshyan, A., Gibson, C. T., Tang, Y., Naidu, R., & Fang, C. (2022). Assessment of microplastics and nanoplastics released from a chopping

board using Raman imaging in combination with three algorithms. *Journal of Hazardous Materials*, 431, 128636.

<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.128636>

Macintosh, A., Simpson, A., Neeman, T., & Dickson, K. (2020). Plastic bag bans: Lessons from the Australian Capital Territory. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104638.

<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104638>

Malafeev, K. V., Apicella, A., Incarnato, L., & Scarfato, P. (2023). Understanding the Impact of Biodegradable Microplastics on Living Organisms Entering the Food Chain: A Review. *Polymers*, 15(18), 3680. <https://doi.org/10.3390/polym15183680>

Mohamed, S. A. A., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A. M. (2020). Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 238, 116178. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.116178>

Moreno-Gordaliza, E., Dolores Marazuela, M., & Milagros Gómez-Gómez, M. (2023). Risk assessment of silver and microplastics release from antibacterial food containers under conventional use and microwave heating. *Food Chemistry*, 420, 136097. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.136097>

Muhib, M. I., Uddin, M. K., Rahman, M. M., & Malafaia, G. (2023). Occurrence of microplastics in tap and bottled water, and food packaging: A narrative review on current knowledge. *Science of The Total Environment*, 865, 161274.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.161274>

- Okeke, E. S., Okoye, C. O., Atakpa, E. O., Ita, R. E., Nyaruaba, R., Mgbechidinma, C. L., & Akan, O. D. (2022). Microplastics in agroecosystems-impacts on ecosystem functions and food chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105961. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105961>
- Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., & Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research*, 141, 307-316. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2018.05.027>
- Prata, J. C. (2023). Microplastics and human health: Integrating pharmacokinetics. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(16), 1489-1511. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2195798>
- Prata, J. C., Silva, A. L. P., da Costa, J. P., Mouneyrac, C., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2019). Solutions and Integrated Strategies for the Control and Mitigation of Plastic and Microplastic Pollution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(13), 2411. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132411>
- Sarkar, S., Manna, S., Das, S., De, S., Paul, P., Dua, T. K., Sahu, R., & Nandi, G. (2023). Current Status of Marine Animal Derived Polysaccharides in Sustainable Food Packaging. *ACS Food Science & Technology*, 3(11), 1877-1889. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00251>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G., & Hazen, E. L. (2021). Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology*, 27(10), 2188-2199. <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

- Sol, D., Menéndez-Manjón, A., Carrasco, S., Crisóstomo-Miranda, J., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2023). Contribution of household dishwashing to microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 45140-45150. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25433-7>
- Talbot, R., & Chang, H. (2022). Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations. *Environmental Pollution*, 292, 118393. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118393>
- Wang, H., & Wang, L. (2017). Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin. *Journal of Cleaner Production*, 143, 624-633. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.064>
- Xu, J., Tang, M., & Xu, X. (2025). Microplastics in food: Sources, distribution, health impacts, and regulation. İçinde *Journal of Food Composition and Analysis* (C. 140). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107274>
- Yadav, H., Khan, M. R. H., Quadir, M., Rusch, K. A., Mondal, P. P., Orr, M., Xu, E. G., & Iskander, S. M. (2023). Cutting Boards: An Overlooked Source of Microplastics in Human Food? *Environmental Science & Technology*, 57(22), 8225-8235. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00924>
- Yang, X., Zhou, Y., Li, Y., & Wang, S. (2024). International Law and Regulation of Marine Microplastics: Current Situation, Problems, and Development. *Sustainability*, 16(21), 9337. <https://doi.org/10.3390/su16219337>
- Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z., & Zeng, E. Y. (2024). Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of

Nanoplastics and Microplastics. *Environmental Science & Technology Letters*, 11(3), 273-279.
<https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

Zhang, K., Shi, H., Peng, J., Wang, Y., Xiong, X., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2018). Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *Science of The Total Environment*, 630, 1641-1653.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.02.300>

GIDA GÜVENLİĞİ: GIDALARDA TOKSİK KONTAMİNANTLAR VE ERKEN YAŞAM MARUZİYETİ

Cavidan DEMİR GÖKİŞİK¹

1. GİRİŞ

Gıda güvenliği, özellikle erken yaşam döneminde, giderek artan bir halk sağlığı sorunu haline gelmiştir. Anne karnı, anne sütü, bebek mamaları ve ek gıdalar yoluyla gerçekleşen erken yaşam maruziyetleri, çocukların akut ve kronik sağlık risklerine karşı son derece hassas olduğu kritik bir dönemi kapsamaktadır. Bu nedenle çocukların gıdalar aracılığıyla toksik kontaminantlara maruziyetinin izlenmesi ve kontrol altına alınması, önemli bir halk sağlığı önceliği ve devlet politikası olmalıdır (Beal ve ark., 2020).

Güncel çalışmalar, bebek mamaları ve çocuklara yönelik hazır gıdalar başta olmak üzere, cipsler, atıştırmalıklar, meyve ve sebzeler, kuruyemişler, baharatlar ve tahıllar gibi temel gıdalarda ağır metaller, mikotoksinler, pestisit kalıntıları, akrilamid ve poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) gibi çok sayıda toksik kontaminantın yüksek düzeylerde bulunduğunu göstermektedir (Garuba ve ark. 2024; Başaran, 2020, 2022; EFSA, 2018; Alexandre ve ark., 2020). Bu toksik bileşiklerin aynı gıda matrisi içerisinde birlikte bulunabilmesi, bebekler ve küçük çocuklar için maruziyet riskini daha da artırmaktadır (Mahmoud ve ark., 2022). Kimyasal kirleticilerin kanser, nörodejeneratif hastalıklar, bağışıklık sistemi bozuklukları ve üreme toksisitesi gibi ciddi

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fak., Gıda Mühendisliği Böl., ORCID: 0000-0001-7273-3156.

sağlık sorunlarının gelişiminde rol oynadığı bildirilmektedir (Onakpa ve ark., 2018). Özellikle bebek mamalarının temel bileşenleri olan pirinçte ağır metaller ve mikotoksinler, buğday ve mısırdaki mikotoksinler, balık ve balık ürünlerinde ise ağır metaller en sık rapor edilen kontaminasyon kaynaklarıdır (Al osman ve ark., 2019). Ağır metaller ve mikotoksinlerin ısıtma işlemlerinden etkilenmemesi, bu kontaminantların işlenmiş ürünlerde de varlığını sürdürmesine neden olurken, akrilamid ve PAH gibi bileşikler gıda işleme süreçleri sırasında ek olarak oluşabilmektedir (EFSA, 2018). Erken yaşam maruziyetlerine ilişkin bildirilen vakaların büyük bölümü, temel besin kaynaklarının mısır, pirinç ve buğday gibi tahıllar olduğu ve gıda güvenliğinin sınırlı kaldığı düşük ve orta gelirli ülkelere rapor edilmektedir. Sahra altı Afrika, Güney Amerika ve Doğu Asya’da yenidoğanlarda nöral tüp defektleri, çocuklarda büyüme ve gelişme geriliği, bağışıklık sistemi bozuklukları ve erken mortalite ile toksik gıda maruziyetleri arasında güçlü ilişkiler bildirilmiştir (Ekwomadu ve ark., 2022; Li ve ark., 2024). Maruziyet süreci, hamile ve emziren annelerin kontamine gıdaları tüketmesiyle başlamakta; plasenta ve anne sütü yoluyla fetüs ve bebeklere aktarılmaktadır (Khezri ve ark., 2025). Bebek mamaları ve tahıl bazlı ek gıdalar, özellikle süttan kesilme döneminde başlıca maruziyet kaynakları arasında yer almaktadır (Hernandez ve ark., 2021). Erken çocukluk dönemi, perinatal programlama süreçleri nedeniyle çevresel faktörlere son derece duyarlıdır; bu dönemde bağırsak, bağışıklık, endokrin ve sinir sistemlerinin gelişimi çevresel toksinler tarafından kalıcı biçimde etkilenebilmektedir (Ngoungoure ve ark., 2025).

Beslenme, yaşamın ilk üç yılında hızlı beyin gelişimi ve bilişsel işlevlerin temelini oluşturan nöral yapıların oluşumu için kritik öneme sahiptir. Nörotoksik maddelere maruziyet, nöronal bağlantıların oluşumunu bozarak nörogelişimsel bozukluklara yol açabilmektedir (Cusick ve Georgieff, 2016; Ngoungoure ve

ark., 2025). Ayrıca okul çağındaki çocuklar da tahıl bazlı atıştırma ve hazır gıdalar yoluyla bu toksinlere maruz kalmakta; bu ürünlerde mikotoksinlerin yasal limitlerin üzerinde bulunduğu çok sayıda çalışma ile gösterilmektedir (Murashiki ve ark., 2017; Gökışık ve Kahtalı, 2023; Matos ve ark., 2024; Eskola ve ark., 2020).

2. MİKOTOKSİNLER

Mikotoksinler; *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Claviceps* ve *Alternaria* cinslerine ait filamentli mantarlar tarafından üretilen, gıda ve yemlerde yaygın olarak bulunan toksik ikincil metabolitlerdir. Tahıllar, yağlı tohumlar, kuruyemişler, meyve ve sebzeler, kurutulmuş ürünler ve hayvan yemleri mikotoksin kontaminasyonuna en sık maruz kalan tarımsal ürünlerdir (Alvito and Pereira, 2022; Gökışık ve Kahtalı, 2023; Matos ve ark., 2024). Mikotoksinlerin gıda işleme ve depolama süreçlerine karşı yüksek stabilite göstermeleri, bu bileşiklerin nihai ürünlere taşınmasına ve beslenme zincirine girmesine neden olmaktadır (Smith ve ark., 2012; Matos ve ark., 2024). Günümüze kadar 400'den fazla mikotoksin tanımlanmış olup, halk sağlığı açısından en önemlileri; *Aspergillus* türleri tarafından üretilen aflatoksinler (AFs) ve okratoksin A (OTA), *Fusarium* türleri tarafından üretilen fumonisinler (FBs), trikotesenler (özellikle deoksinivalenol; DON) ve zearalenon (ZEN) ile *Penicillium* türleri tarafından üretilen patulin (PAT) ve sitrinindir (Eskola ve ark., 2020; Alvito and Pereira, 2022).

Mikotoksinler küresel ölçekte yaygın olmakla birlikte, özellikle Sahra altı Afrika gibi gelişmekte olan bölgelerde uygun olmayan üretim, depolama ve iklim koşulları nedeniyle ciddi bir halk sağlığı sorunu oluşturmaktadır (Christiana ve ark., 2022). Bu bölgelerde fumonisin maruziyetinin atlarda lökoensefalomalazi ve domuzlarda pulmoner ödem sendromu gibi ağır

mikotoksikozislere yol açtığı; insanlarda ise özofagus ve karaciğer kanseri insidansının yüksekliği ile ilişkili olduğu bildirilmektedir (Yli-Mattilla ve ark., 2022). Ayrıca mikotoksin maruziyetinin bebeklerde nöral tüp defektleri ve çocuklarda büyüme ve gelişme geriliği ile ilişkili olduğu rapor edilmiştir.

Mikotoksinler, bağışıklık sisteminin baskılanması, genotoksik, teratojenik ve karsinojenik etkiler gibi ciddi sağlık riskleri oluşturmaktadır (Kamala ve ark., 2016; Smith ve ark., 2017). Aflatoksin B1, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) tarafından insanlar için kanserojen (Grup 1) olarak sınıflandırılmıştır (IARC, 2012). Okratoksin A muhtemel insan kanserojeni (Grup 2A), fumonisin B1 ise muhtemel kanserojen (Grup 2B) olarak değerlendirilmiştir (IARC, 2002). FAO/WHO Ortak Gıda Katkı Maddeleri Uzman Komitesi (JECFA), aflatoksin B1 için günlük 1 µg/kg vücut ağırlığı ve fumonisinler için 2 µg/kg vücut ağırlığı geçici maksimum tolere edilebilir günlük alım (PMTDI) değerleri belirlemiştir. Buna rağmen, özellikle gelişmekte olan ülkelerde bu sınırların üzerinde maruziyetlerin devam ettiği bildirilmektedir (JECFA, 2012).

Bebekler ve çocuklar, diyetlerinin büyük ölçüde tahıl bazlı ürünlerden oluşması nedeniyle mikotoksinlere karşı en hassas gruplardır. Bebek mamaları, kahvaltılık gevrekler, atıştırmalıklar ve tamamlayıcı gıdalarda mikotoksin varlığı sıklıkla rapor edilmiştir (Piacentini ve ark., 2019). Bazı mikotoksinlerin kan-beyin bariyerini geçerek merkezi sinir sistemini etkileyebilmesi, erken yaşam döneminde maruziyetin nörogelişimsel bozukluklara yol açabileceğini düşündürmektedir (Wu ve ark., 2014; Abia ve ark., 2025). Nitekim beyin gelişiminin kritik dönemlerinde mikotoksin maruziyetinin çocuklarda nörobilişsel işlevleri olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir (Ngoungoure ve ark., 2025).

Anne sütü ve hayvansal süt ürünleri, özellikle aflatoksin M1 (AFM1) ve OTA açısından, bebekler için önemli bir maruziyet kaynağıdır (Ismaiel ve Papenbrock, 2015; Alvito and Pereira, 2022). Genel olarak tahıllar ve tahıl bazlı ürünler, tüm yaş gruplarında kronik diyet mikotoksin maruziyetine en büyük katkıyı sağlamaktadır (JECFA, 2016).

Sonuç olarak, mikotoksin kontaminasyonu küresel ölçekte önemli bir halk sağlığı sorunu olup, en yüksek risk grubunu bebekler ve gelişim çağındaki çocuklar oluşturmaktadır. Bu nedenle mikotoksinlere yönelik mevzuatın güçlendirilmesi, etkin izleme ve denetim sistemlerinin uygulanması ve hassas nüfus gruplarının korunmasına yönelik önleyici stratejilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

3. FOOD ADDITIVES

Gıda katkı maddeleri; renklendirici, koruyucu, aroma verici, tatlandırıcı, asitlik düzenleyici, stabilizatör gibi işlevlerle işlenmiş (işlenmiş/ürün haline getirilmiş) gıdaların daha çekici, raf ömrü daha uzun, tat ve görünüş olarak “istek uyandıran” gıdalar haline gelmesini sağlıyor. Regülatörler (yönetmelikler, standartlar) çerçevesinde belirlenen katkı maddeleri, belirlenen limitlerde kullanıldığında “güvenli kabul edilen” kimyasallar oluyor. Ancak, özellikle çocuklar gibi hassas gruplar için “güvenli kabul edilen” bu maddelerin bile potansiyel riskleri olduğu konusunda uyarılar artıyor (IARC, 1983).

Artan bilimsel kanıtlar, gıda katkı maddesi olarak kullanılan sentetik kimyasalların, hem işleme sırasında gıdaya kasıtlı olarak eklenen (doğrudan) hem de ambalajlama veya üretimde gıdayı kirletebilecek malzemelerde kullanılan (dolaylı) kimyasalların, çocuk sağlığı üzerinde potansiyel olumsuz etkileri olduğunu göstermektedir. Gıda katkı maddelerine ilişkin endişe, son 20 yılda, endokrin bozulmasını ve diğer olumsuz sağlık

etkilerini giderek daha fazla belgeleyen çalışmalar nedeniyle artmıştır. (Leonardo Trasande ve ark., 2018). Çocuğun metabolik sisteminin özgünlüğü nedeniyle, katkı maddesinin olumsuz etkilerinin ortaya çıkma riski daha yüksektir. Çocukların tükettiği gıdalarda en sık bulunan katkı maddelerinin bisfenoller, ftalatlar, perfloroalkil kimyasallar, perkloratlar, nitratlar ve nitritler, yapay gıda boyaları, monosodyum glutamat ve aspartam olduğu tespit edilmiştir. Ebeveynlerin ve gençlerin sürekli eğitimi yoluyla bu katkı maddelerinin varlığı ve potansiyel riskleri konusunda farkındalığın artırılması, yeni tescil edilen katkı maddelerinin aktif olarak izlenmesi ve yetkili merciler tarafından mevcut yasal düzenlemelerin uyumlaştırılması, katkı maddelerinin çocuk sağlığı üzerindeki istenmeyen etkilerini önemli ölçüde önleyebilir (Savin ve ark., 2022).

3.1. Nitratlar ve Nitritler

Nitratlar ve nitritler, başta kürlenmiş ve işlenmiş et ürünleri olmak üzere balık ve peynirlerde koruyucu olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu bileşiklerin diyetle alımı sonrasında, sekonder aminler veya amidlerle reaksiyona girerek vücutta kanserojen N-nitrozo bileşiklerinin oluşumuna yol açabildiği bilinmektedir. Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), 2015 yılında işlenmiş etleri (tuzlanmış, kurutulmuş veya lezzet ve raf ömrünü artırmak amacıyla farklı işlemlerden geçirilmiş etler dâhil) Grup 1 insan kanserojeni olarak sınıflandırmıştır. Bu tür işleme yöntemleri, özellikle kolorektal kanser riskiyle ilişkilendirilen N-nitrozo bileşiklerinin oluşumunu artırmaktadır (Grosse ve ark., 2006). Çocukların vücut ağırlıklarına göre daha yüksek oranda gıda tüketmeleri ve detoksifikasyon mekanizmalarının tam gelişmemiş olması, bu katkı maddelerine karşı daha hassas olmalarına neden olmaktadır. IARC, Nitrat ve nitriti N-nitrozo bileşiklerini (nitrozaminler) oluşturabilme potansiyeline dayanarak işlenmiş etlerde Grup 1 kanserojen, endojen nitrozasyon koşullarında Grup 2 muhtemel

kanserojen olarak sınıflandırmıştır (IARC, 2012). Nitrozaminlerin birçoğu güçlü kanserojen olarak bilinmektedir.

Çocuklarda mide pH'nın daha yüksek olması, bağışıklık ve detoksifikasyon sistemlerinin tam olgunlaşmamış olması ve vücut ağırlığına göre daha yüksek gıda alımı, nitrat ve nitritlerin endojen nitrozasyon yoluyla oluşturduğu riski artırabilmektedir. Bu nedenle, özellikle nitrat/nitrit içeren işlenmiş gıdaların çocuk beslenmesinde sınırlandırılması önerilmektedir (Pogoda ve ark., 2009).

3.2. Yapay Gıda Renklendiricileri

Yapay gıda renklendiricileri yiyecek ve içeceklerin görsel çekiciliğini artırmak amacıyla kullanılmakta ve özellikle çocuklara yönelik parlak renkli ürünlerin üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Bazı ürünlerde, örneğin düşük meyve içeriğine sahip veya hiç meyve içermeyen içeceklerde, doğal içeriği taklit eden bir unsur olarak da kullanılabilir (Stevens ve ark., 2013). Son birkaç on yılda yapılan çalışmalar, yapay renklendiricilerin çocuk davranışları üzerindeki etkisi ve dikkat eksikliği/hiperaktivite bozukluğu semptomlarını şiddetlendirmedeki rolü konusunda endişeleri artırmıştır. Diyetten bunların çıkarılması, dikkat eksikliği/hiperaktivite bozukluğu olan çocuklara fayda sağlayabilir (Nigg ve ark., 2012). Etki mekanizmaları henüz tam olarak aydınlatılmamış olsa da, kan-beyin bariyerini geçebilir (Stevenson ve ark., 2014). Çocukların yapay gıda renklendiricileri içeren ürünleri yetişkinlere kıyasla daha sık tüketmeleri nedeniyle, bu katkı maddelerine bağlı aşırı duyarlılık reaksiyonları, davranış ve dikkat bozuklukları ile öğrenme güçlükleri gibi olası olumsuz sağlık etkilerine karşı daha duyarlı oldukları bildirilmektedir (JECFA, 2016).

3.3. Monosodyum Glutamat (MSG) – Aroma Artırıcı

Aroma artırıcılar, gıdada mevcut olan tat ve aromaların algılanmasını güçlendirerek ürünün daha belirgin lezzet özellikleri kazanmasını sağlayan katkı maddeleridir. Monosodyum glutamat, glutamik asidin sodyum tuzu olup, hem bitkisel hem de hayvansal proteinlerin doğal bir bileşenidir ve insan beslenmesindeki proteinlerin yaklaşık %10–25’ini oluşturan glutamat formunu temsil eder (Abdou ve ark., 2025). ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından “genel olarak güvenli” (GRAS) olarak kabul edilmesine rağmen, monosodyum glutamat, güvenilirliği en çok tartışılan gıda katkı maddelerinden biri olmaya devam etmektedir. Bazı çalışmalar, özellikle yüksek alım düzeylerinde potansiyel olumsuz sağlık etkilerine işaret etmektedir (Bera ve ark., 2017).

Glutamik asit insan vücudunda kolaylıkla metabolize edilmekle birlikte glutamatın merkezi sinir sisteminde önemli bir nörotransmitter olması nedeniyle, aşırı alımının özellikle çocuklar açısından risk oluşturabileceği ileri sürülmektedir. Glutamat reseptörlerinin aşırı uyarılması sonucu gelişen nörotoksisite; amiyotrofik lateral skleroz, Alzheimer hastalığı, şizofreni ve bağımlılık gibi akut ve kronik nörodejeneratif hastalıkların gelişme riskiyle ilişkilendirilmektedir (JECFA, 2006).

4. İŞLEME VE PİŞİRME SIRASINDA OLUŞAN TOKSİNLER

4.1. Akrilamid

Akrilamid, 120 °C üzerinde yüksek sıcaklıkta kızartma, kavurma ve fırınlama gibi yüksek sıcaklıkta pişirme işlemlerinde bazı gıdalarda oluşabilen bir kimyasaldır. Akrilamid, gıdalarda doğal olarak bulunan şeker ve amino asitin yüksek sıcaklıkta

reaksiyonu ile oluşan kanserojen bir kimyasal bileşiktir (WHO, 2010). Akrilamide yüksek maruziyet nedeniyle, özellikle akrilamid sağlık riskleri konusunda farkındalığın hala çok düşük olduğu gelişmekte olan ülkelerde, toksik etkisinin tanınması gereklidir. Akrilamid nörotoksisite, genotoksisite, karsinojenite, üreme toksisitesi, hepatotoksisite ve immünotoksisite dahil olmak üzere maruziyetinin farklı toksik etkilerine sahiptir (Rifai and Saleh, 2020). Isıl işlem görmüş gıdalarda akrilamid bulunması, bu maddenin Uluslararası Kansere Araştırma Ajansı (IARC) tarafından muhtemel insan kanserojeni olarak sınıflandırılması nedeniyle dünya çapında bir sağlık endişesidir (Wong, 2017). Akrilamid, öncelikle karbonhidrat bakımından zengin ve protein bakımından düşük ham maddelerden elde edilen gıda ürünlerinde oluşur (Fodor ve ark., 2015). Kek, ekmek, patates kızartması ve cips gibi kızartılmış, derin yağda kızartılmış veya fırınlanmış gıdaların en yüksek Akrilamid seviyelerini içerdiğine inanılmaktadır (Hamzalıoğlu ve ark., 201). Çocuklarda ve tüm yaşlarda sinir sistemi hasarı ve kanserojen etkiye sahiptir (WHO, 2010).

4.2. Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH'lar)

Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), halk sağlığı açısından önemli endişe kaynağı olan eski kirleticilerdir. Polisiklik aromatik hidrokarbonlar doğal ve insan kaynaklı olup çevrede yaygın olarak bulunur. Birçok PAH, kanserojen ve mutajenik özellikleriyle birlikte insanlar için oldukça toksiktir (Barbosa et al. 2023). Bunlar ortam havasında partikül fazında bulunabilir. Yüksek molekül ağırlıklı birçok PAH, insanlarda kanserojen ve mutajenik etkilerle ilişkilendirilmiştir; bunlar arasında BAP, Uluslararası Kansere Araştırma Ajansı (IARC) tarafından 1. sınıf bilinen insan kanserojeni olarak sınıflandırılmıştır (IARC, 2010). Bir diğer bileşik olan DBC, 2A sınıfı muhtemel insan kanserojeni olarak sınıflandırılmıştır (IARC, 2010). Hem BAP hem de DBC, özellikle akciğer ve cilt

kanseri olmak üzere birçok kanser türüyle bağlantılı çevresel kanserojenlerdir (Chang ve ark., 2019).

PAH'lar, insan ve hayvanlar üzerindeki önemli sağlık riskleri ve olumsuz etkileri nedeniyle geniş çapta endişe kaynağıdır. Günümüzde, çevredeki PAH'ların ana kaynakları, fosil yakıtların eksik yanması, belediye atıklarının yakılması ve tarımsal yüzey dışı kaynaklı emisyonlardır, ızgara, tütsülenmiş balık/et, kömür ateşinde pişirme işlemleride gıdalarda PAH oluşumuna neden olur. İnsanların ve hayvanların PAH'lara maruz kalması, kanserojenite ve teratojenite, genotoksisite, üreme ve endokrin bozucu etkiler, immünotoksisite ve nörotoksisite dahil olmak üzere çeşitli olumsuz etkilere yol açabilir (IARC, 2010).

5. ENVİRONMENTAL POLLUTANTS AND PACKAGING-DERIVED TOXİNS

5.1. Ağır Metallere Maruziyet

ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA), Arsenik (As), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), kurşun (Pb) metallerini ve metaloid As'yi "ağır metaller" olarak tanımlar ve düzenler. Bu "ağır metaller" çevrede doğal olarak bulunur ve endüstriyel kirleticiler olarak çevreye girebilir. Ayrıca, bitkilerin alımı, hayvanların kirli su veya gıda tüketimi ve/veya tarımsal veya üretim süreçleri yoluyla gıda tedarikine de girebilirler (FDA, 2021). Arsenik (özellikle inorganik arsenik) pirinç ve pirinç ürünlerinde en yüksek bulunur ve insanlarda kanserojendir. Kurşun (Pb) su, tahıllar, sebzeler ve kirli toprakta yetişen ürünlerde bulunabilir. İnsanlarda sinir sistemi hasarı ve çocuklarda zeka geriliğine neden olur. Kadmiyum (Cd) pirinç, deniz ürünleri, su ve kakao gibi her türlü üründe bulunur. Böbrek hasarı ve kemik erimesine neden olur. Cıva (Hg) yüksek bulunduğu ürünler büyük balıklar ve diğer deniz ürünleridir. İnsanlarda nörotoksisite, hamilelerde fetal gelişim bozukluğuna neden olur (Cai ve ark., 2015).

İnsanlar, özellikle çocuklar, havada, toprakta, tozda, suda ve gıda kaynaklarında bulunan ağır metallere maruz kalmanın etkilerine karşı savunmasızdır (Zeng ve ark., 2016). Ağır metallere en yüksek maruziyet gıdaların, suyun ve ev tozunun ağızdan alınması ile oluşmaktadır (Han ve ark., 2018).

Gıdalardaki ağır metaller literatürde onlarca yıldır kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Başaran, 2022). Son on yılda yapılan çalışmalara göre, bebek mamalarında, toz halindeki işlenmiş bebek mamalarında ve hazır bebek mamalarında en çok tespit edilen ağır metaller arsenik (As), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve cıva (Hg) olmuştur (Zeng ve ark., 2019; Başaran, 2022; Garuba et al., 2024). As, Cd ve Pb havada, toprakta ve suda yaygın olarak bulunan doğal olarak oluşan kirleticilerdir, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC), As ve Cd'yi insanlar için kanserojen metaller (Grup 1) olarak sınıflandırırken, Pb'yi insanlar için muhtemelen kanserojen olarak sınıflandırdı (Grup B2) (IARC, 1983).

5.2. Pestisitler

Pestisitler, tarımda zararlı böcek, ot ve mantar gibi organizmaları kontrol etmek için kullanılan kimyasal ajanlardır. Bu kimyasallar toprağa, suya ve bitkilere uygulandığında doğrudan ürün yüzeyinde veya dokusunda kalıntı bırakabilirler. Bu kalıntılar hasattan sonra yıkanma ve işleme süreçlerinden tam olarak uzaklaşmayabilir ve tüketim sırasında gıdaya geçebilir (WHO, 2016). Devlet ve uluslararası kuruluşlar, bu kalıntıların maksimum kalıntı limitleri (MRL) çerçevesinde kontrol edilmesi gerektiğini kabul eder; ancak izleme raporları bazı ürünlerde bu sınırların aşıldığını göstermektedir (Mielech et al., 2021). Türkiye’de gıdalardaki Gıdalardaki pestisit kalıntıları hakkında yürütülen bazı akademik çalışmalardan elde edilen bilgiler ise kısaca şöyle: 2013 yılında yapılan bir çalışmada analiz edilen gıda örneklerinin yüzde 21’inin, 2014 yılında yapılan çalışmada ise

yüzde 25'inin yasal mevzuatta belirtilen maksimum kalıntı limit değerlerinden daha yüksek miktarda pestisit kalıntısı içerdiği tespit edildi. Bu değerler AB ülkelerinde yürütülen çalışmalarda saptanan değerlerin yaklaşık 6-7 katı düzeyinde. (<https://tr.boell.org/tr/2023/06/12/kalintilar-her->).

Çocukların pestisitlere maruz kalması nörolojik davranışsal eksikliklere, bilişsel yeteneklerde bozulmaya (düşük zekâ katsayısı (IQ)), dikkat bozukluklarına, büyümede değişikliklere, daha nadir görülen kanser türlerinin ortaya çıkmasına, solunum problemlerine (rinit, öksürük, kronik bronşit ve astım) ve diğer ciddi sağlık sorunlarına yol açabileceği için önemli bir sorundur (EFSA, 2018). Çocuklar genellikle yetişkinlere göre daha yüksek dozlarda zararlı kimyasal bileşiklere maruz kalırlar. Hamilelik sırasında pestisitlere maruz kalmak, fetüsün uygunsuz büyümesine ve gelişmesine ve düşük vücut ağırlığına ve anormal ilkel reflekslere sahip bir bebeğin doğumuna katkıda bulunabilir. Maruziyet ayrıca, daha sonraki çocukluk döneminde çocuklarda daha önce bahsedilen bilişsel ve motor bozukluklarla (hiperaktivite, otizm) da ilişkilidir (WHO, 2016).

5.3. Plastik ve Ambalajdan Geçen Kimyasallar

Plastik ve diğer gıda ambalajları, üretim sırasında dayanıklılık, esneklik, ısı dayanımı gibi özellikler kazandırmak için binlerce farklı kimyasal katkı içerir. Bu katkı maddelerinin çoğu, ftalatlar (ör. DEHP, DEHA): ftalat esterleri (PAE'ler), bisfenoller (özellikle Bisfenol A – BPA), polibromlanmış difenil eterler (PBDE'ler) ve nonilfenol (NP) gibi, sucul organizmalar üzerinde potansiyel kanserojen, mutajenik, üreme ve gelişim etkileri, kardiyovasküler ve endokrin bozucu etkilere sahiptir. Bu katkı maddeleri zamanla gıdalara göç edebilir (migrasyon) ve insan vücuduna temas edebilir. Bu kimyasalların gıdalara geçişi; sıcaklık, temas süresi, yağ içeriği gibi faktörlere göre artar.

Örneğin yağlı/asitli gıdalar ve yüksek ısıda temas, kimyasal göçünü hızlandırır. Bu etkiler, özellikle fetüs, bebek ve çocuklarda kritik gelişim dönemlerinde daha belirgin olabilir (Yang et al., 2024). Plastik ambalajlardan göç eden bazı kimyasallar için tolerable daily intake (TDI) ve specific migration limits (SML) gibi düzenleyici sınırlar belirlenmiştir. BPA için örneğin belirlenen TDI değeri sınırlandırılmıştır ve Avrupa’da BPA’ya ilişkin yeni düzenlemeler yürürlüğe girmektedir (EFSA, 2018).

6. SONUÇ

Ocak 2010 – Nisan 2022 tarihleri arasında, uluslararası alanda tanınmış profesyonel kuruluşlar tarafından yayımlanan kamuya açık belgelerin incelenmesi sonucunda, çocukların tükettiği gıdalarda en sık karşılaşılan katkı maddelerinin bisfenoller, ftalatlar, perfloroalkil kimyasallar, perkloratlar, pestisitler, nitratlar ve nitritler, yapay gıda renklendiricileri, monosodyum glutamat ve aspartam olduğu belirlenmiştir (Savin ve ark.,2022). Ebeveynler ve çocuklara yönelik sürekli eğitim programları aracılığıyla katkı maddelerinin varlığı ve potansiyel riskleri konusunda farkındalığın artırılması, yeni ruhsatlandırılan katkı maddelerinin etkin biçimde izlenmesi ve mevcut yasal düzenlemelerin yetkili kurumlarca uyumlu hâle getirilmesi, katkı maddelerinin çocuk sağlığı üzerindeki olası olumsuz etkilerinin önlenmesinde önemli rol oynayacaktır. Sonuç olarak, toksik gıda kontaminantlarına maruziyet her yaş grubunda mümkün olmakla birlikte, büyüme ve gelişim sürecindeki çocuklarda çok daha ciddi biyolojik hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, özellikle çocuklara yönelik gıdalarda maksimum limitlerin belirlenmesi, izleme ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi ve koruyucu halk sağlığı politikalarının uygulanması büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdou, H. M., El-Gendy, A. H., et al. (2025). Evaluation of the Effects of Monosodium Glutamate Overconsumption on the Functions of the Liver, Kidney, and Heart of Male Rats: The Involvement of Dyslipidemia, Oxidative Stress, and Inflammatory Responses. *Journal of Xenobiotics*, 15(3), 64. <https://doi.org/10.3390/jox15030064>.
- Abia, W.A., Foupouapouognigni, Y., Nfombouot, H.P.N. et al. A scoping review on mycotoxin-induced neurotoxicity. *Discov Toxicol* 2, 1 (2025).
- Al osman, M., Yang, F. & Massey, I.Y. Exposure routes and health effects of heavy metals on children. *Biometals* 32, 563–573 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00193-5>.
- Alexandre Nougadère, Véronique Sirot, Jean-Pierre Cravedi, Paule Vasseur et al. (2020). Dietary exposure to pesticide residues and associated health risks in infants and young children – Results of the French infant total diet study, *Environment International*, 137,105529,0160-4120. doi.org/10.1016/j.envint.2020.105529
- Alvito P, Pereira-da-Silva L. (2022). Mycotoxin Exposure during the First 1000 Days of Life and Its Impact on Children's Health: A Clinical Overview. *Toxins (Basel)*.4;14(3):189. doi: 10.3390/toxins14030189.
- Barbosa, F., Rocha, B. A., Souza, M. C. O. et al. (2023). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): Updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 26(1), 28–65. <https://doi.org/10.1080/10937404.2022.2164390>.

- Başaran, B. (2020). The evaluation of childhood foods and infant formula exposure to furan, Chloropropanols and acrylamide contamination by food processing. IntechOpen.
- Başaran, B. (2022). An assessment of heavy metal level in infant formula on the market in Turkey and the Hazard index. Journal of Food Composition and Analysis, 105, 104258. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104258>
- Beal, Judy A. DNSc, RN, FNAP, FAAN. (2020). World Health Organization Alert on High Level of Sugar in Baby Food. MCN, The American Journal of Maternal/Child Nursing 45(1):p 60, January/February. DOI: 10.1097/NMC.0000000000000584
- Bera, T.K.; Kar, S.K.; Yadav, P.K.; Mukherjee, P.; Yadav, S.; Joshi, B. Effects of monosodium glutamate on human health: A systematic review. World J. Pharm. Sci. 2017, 5, 139–144.
- Cai, J., You Li, Shuzhen Liu, Qiumei Liu, Min xu et al. (2022). Associations between multiple heavy metals exposure and glycated hemoglobin in a Chinese population, Chemosphere, 287,2;132159,0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132159>.
- Chang, J., Jianing Shen, Jing Tao, Na Li, et al. (2019).The impact of heating season factors on eight PM2.5-bound polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentrations and cancer risk in Beijing, Science of The Total Environ., 688,1413-1421, 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.149>.
- Christiana Cudjoe D, Balali GI, Titus OO, Osafo R, Taufiq M. Food Safety in Sub-Sahara Africa, An insight into Ghana

- and Nigeria. *Environmental Health Insights*. 2022;16. doi:10.1177/11786302221142484.
- Cusick SE, Georgieff MK. (2016). The Role of Nutrition in Brain Development: The Golden Opportunity of the "First 1000 Days". *J Pediatr*. 175:16-21. doi: 10.1016/j.jpeds.2016.05.013.
- EFSA (2018). Scientific opinion on pesticides in foods for infants and young children. EFSA Panel on Plant Protection Products and their Residues (PPR), <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5286>
- Ekwomadu, T., Mwanza, M., & Musekiwa, A. (2022). Mycotoxin-Linked Mutations and Cancer Risk: A Global Health Issue. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7754. doi.org/10.3390/ijerph19137754.
- Eskola, M., Kos, G., Elliot, C.T., Hasjlova, C., Mayar, S., Krska, R., 2020. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25 %. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 16 (60), 2773–2789. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>.
- Fodor IK, Nita A, Felicia D, et al. Acrylamide, the health enemy from food products that are processed at high temperatures. *Analele Universitatii din Oradea, Fascicula: Ecotoxicologie, Zootehnie si Tehnologii de Industrie Alimentara*. 2015;14:157–164.
- Garuba OD, Anglin JC, Good S, Olufemi SE, Oyawoye OM, et al. Evaluation of Heavy Metals in Commercial Baby Foods. *Arch Food Nutr Sci*. 2024; 8: 012-020. DOI: 10.29328/journal.afns.1001056.
- Gökışık, C.D., Kahtalı, K. (2023) Determination of fumonisins exposure in children and youth consuming corn-based

- products in Giresun, Turkey, *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 2023, 105566, 0889-1575, doi:10.1016/j.jfca.2023.105566.
- Grosse Y, Baan R, Straif K, Secretan B, El Ghissassi F, Coglianov V; WHO International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. Carcinogenicity of nitrate, nitrite, and cyanobacterial peptide toxins. *Lancet Oncol.* 2006;7(8):628–629.
- Hamzalıoğlu A, Mogol BA, Gökmen V. Acrylamide: an overview of the chemistry and occurrence in foods. *Encycl Food Chem.* 2019;492–499.
- Han, Y., Jiali Cheng, Di An, Ying He, Zhenwu Tang, 2022. Occurrence, potential release and health risks of heavy metals in popular take-out food containers from China, *Environmental Research*, 206; 112265, 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112265>.
- Hernández, D., Ros, M., Carmona, F., Saez-Tovar, J. A., & Pascual, J. A. (2021). Composting Spent Mushroom Substrate from *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* Production as a Growing Media Component for Baby Leaf Lettuce Cultivation under *Pythium irregulare* Biotic Stress. *Horticulturae*, 7(2), 13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7020013>.
- IARC (2002) International Agency for Research on Cancer. Fumonisin B1. In: Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene. WHO IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 82, IARC, Lyon, France (2002), pp. 301-366. <https://doi.org/10.1016>.

- IARC (2012). International Agency for Research on Cancer. Review of Human Carcinogens: Chemical Agents and Related Occupations. Geneva: World health organization.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Ingested nitrate and nitrite, and cyanobacterial peptide toxins. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum. 2010; 94:v–vii, 1–412.
- IARC. 1983. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk of chemicals to humans. Some food additives, feed additives and naturally occurring substances. International Agency for Research on Cancer, Volume 31, Lyon, France.
- IARC. 2015. Mycotoxin control in low- and middle-income countries. IARC Working Group report no. 9, eds. C. P. Wild, J. D. Miller, and J. D. Groopman. Lyon, France:
- Ismail, A. A., & Papenbrock, J. (2015). Mycotoxins: Producing fungi and mechanisms of phytotoxicity. *Agriculture*, 5(3), 492–537. <https://doi.org/10.3390/agriculture5030492>.
- JEFCA, 2016. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. 2016. 83rd Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) Eighty-third meeting Summary and conclusions. Rome (Italy).
- Khezri, R., Rezaei, F., Jahanfar, S. et al. Association between maternal anemia during pregnancy with low birth weight their infants. *Sci Rep* 15, 6446 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91316-1>.
- Leonardo Trasande, Rachel M. Shaffer, Sheela Sathyanarayana, Council On Environmental Health, Jennifer A. Lowry, Samantha Ahdoot, Carl R. Baum, FACMT, Aaron S. Bernstein, Aparna Bole, Carla C. Campbell, Philip J.

- Landrigan, Susan E. Pacheco, Adam J. Spanier, Alan D. Woolf; Food Additives and Child Health. *Pediatrics* August 2018; 142 (2): e20181410. 10.1542/peds.2018-1410.
- Li, Yong-Shan, Chia-Cheng Wei (2024). Mycotoxin zearalenone induces multi-/trans-generational toxic effects and germline toxicity transmission via histone methyltransferase MES-4 in *Caenorhabditis elegans*, *Environmental Pollution*, 361, 124787, 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124787>.
- Mahmoud M. Ghuniem, Mona A. Khorshed, Sherif M. El-safty, Eglal R. Souaya & Mostafa M.H. Khalil. (2022) Assessment of human health risk due to potentially toxic elements intake via consumption of Egyptian rice-based and wheat-based baby cereals. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 102:18, pages 6936-6954.
- Matos, N.A.V., de Moraes, M.H.P., Sartori, A.V., Jacob, S. do C., 2021. Optimization and validation of an analytical method for the determination of free and hidden fumonisins in corn and corn products by UHPLC-MS/MS food analytical methods. *Food Anal. Methods* 14, 1611–1624. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-01984-8>.
- Mielech, A., Puścion-Jakubik, A., & Socha, K. (2021). Assessment of the Risk of Contamination of Food for Infants and Toddlers. *Nutrients*, 13(7), 2358. <https://doi.org/10.3390/nu13072358>.
- Ngoungoure, L. V. N., W. A. Abia, B. V. A. Owona, et al. 2025. “Neurodevelopmental Outcomes of Mycotoxins Exposure and Effect on Brain Development in Infants and Young Children.” *Developmental Neurobiology* 85, no. 4: 85, e23000. <https://doi.org/10.1002/dneu.23000>.

- Nigg JT, Lewis K, Edinger T, Falk M. Meta-analysis of attention-deficit/hyperactivity disorder or attention-deficit/hyperactivity disorder symptoms, restriction diet, and synthetic food color additives. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry*. 2012;51(1):86–97.e8.
- Onakpa MM, Njan AA, Kalu OC. A Review of Heavy Metal Contamination of Food Crops in Nigeria. *Ann Glob Health*. 2018 Aug 31;84(3):488-494. doi: 10.29024/aogh.2314.
- Pogoda JM, Preston-Martin S, Howe G, et al. An international case-control study of maternal diet during pregnancy and childhood brain tumor risk: a histology-specific analysis by food group. *Ann Epidemiol*. 2009;19(3):148–16.
- Rifai L, Saleh FA. A Review on Acrylamide in Food: Occurrence, Toxicity, and Mitigation Strategies. *International Journal of Toxicology*. 2020;39(2):93-102. doi:10.1177/1091581820902405.
- Savin, M., Vrkić, A., Dedić, D., Vlaški, T., Vorgučin, I., Bjelanović, J., & Jevtic, M. (2022). Additives in Children's Nutrition—A Review of Current Events. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13452. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013452>.
- Smith L.E., Stoltzfus R.J., Prendergast A. 2012. Food chain mycotoxin exposure, gut health, and impaired growth: A conceptual framework. *Adv. Nutr.*;3:526–531. doi: 10.3945/an.112.002188.
- Smith M.-C., Madec S., Coton E., Hymery N. 2016. Natural co-occurrence of mycotoxins in foods and feeds and their in vitro combined toxicological effects. *Toxins*. 8:94. doi: 10.3390/toxins8040094.

- Stevens LJ, Kuczek T, Burgess JR, Stochelski MA, Arnold LE, Galland L. 2013. Mechanisms of behavioral, atopic, and other reactions to artificial food colors in children. *Nutr Rev.* 71(5):268–281.
- Stevenson J, Buitelaar J, Cortese S, et al. Research review: the role of diet in the treatment of attention-deficit/hyperactivity disorder--an appraisal of the evidence on efficacy and recommendations on the design of future studies. *J Child Psychol Psychiatry.* 2014;55(5):416–427.
- Wong KA. Screening for Acrylamide Levels in French Fries Using Portable Vibrational Spectrometers. Columbus, OH: The Ohio State University; 2017.
- WHO, 2010. World Health Organization. Acrylamide levels in food should be reduced because of public health concern says UN expert committee. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Wu F., Groopman J.D., Pestka J.J. Public health impacts of foodborne mycotoxins. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 2014;5:351–372. doi: 10.1146/annurev-food-030713-092431.
- Yang, P., Zhinan Su, Kam W. Tang, et al. (2024). Plastic liners as a simple and effective approach to reduce CH₄ and N₂O emissions from aquaculture ponds, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 375, 109191, 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109191>.
- Yli-Mattila, T., & Sundheim, L. (2022). Fumonisin in African Countries. *Toxins*, 14(6), 419. <https://doi.org/10.3390/toxins14060419>.
- Zeng, X., Xu, X., Qin, Q. et al. 2019. Heavy metal exposure has adverse effects on the growth and development of

preschool children. Environ Geochem Health 41, 309–321. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0114-z>.

ET ÜRÜNLERİNDE NİTRİT VE NİTRAT KULLANIMINDA ALTERNATİF KÜRLEME YAKLAŞIMLARI

Halime ALP¹

1. GİRİŞ

Tüketici talepleri dünya çapında benzerlikler gösterse de, Amerika, Avrupa ve Asya ülkeleri arasında önemli farklılıklar bulunabilmektedir (Smith, Gotoh, & Greenwood, 2018). Bu bağlamda, et ve et ürünleri tüketimini etkileyen hayvan refahına yönelik tüketici talebinde Avrupa' da geniş bir heterojenlik bulunmaktadır. Bu durum, üretim sistemlerini daha hayvan dostu, hayvancılık üretim sistemlerinin uygulanmasına ve çevresel etkinin azaltılmasına yönlendirmiştir (De Jonge & Van Trijp, 2013). Bununla birlikte, küreselleşme nedeniyle dünya çapında et ürünlerinin tüketimi ve üretimi artmaktadır (Jakobsen & Hansen, 2020). Güneydoğu Asya' da ki tüm ülkeler, vejetaryen nüfusu nedeniyle et tüketimini sürdürmede bir istisna teşkil eden Hindistan hariç, son 40 yılda et tüketimini artırmıştır. Bununla birlikte, Hindistan, Çin ile bölgede büyük bir et üreticisidir. Bu nedenle, ülkeler arasındaki et tüketimi ve üretimindeki farklılıklar, coğrafya ve kültür farklılıklarına dayanmaktadır (Flores & Toldrá, 2021; Jakobsen & Hansen, 2020).

"Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı" (IARC, WHO), kırmızı et ve işlenmiş et tüketimini değerlendirmiş (IARC, 2018) ve sınırlı ve yeterli kanıtlara dayanarak kırmızı et tüketimini muhtemelen kanserojen (Grup 2A) olarak sınıflandırırken,

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Selçuk Üniversitesi, Karapınar Aydoğanlar Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0001-5833-9611.

işlenmiş eti insanlar için kanserojen (Grup 1) olarak sınıflandırmıştır. Bu bulgulara dayanarak, IARC et tüketimini sınırlamaya yönelik mevcut halk sağlığı önerilerine destek sağlamıştır. IARC raporunda kırmızı et, sığır eti, dana eti, domuz eti, kuzu eti, koyun eti, at ve keçi eti gibi her türlü memelinin kasından elde edilen kas etini ifade ederken, işlenmiş et, lezzeti artırmak veya korumayı iyileştirmek için tuzlama, kürlleme, fermentasyon, tütsüleme veya diğer işlemlerle dönüştürülmüş eti ifade etmektedir.

Kürleme yaygın olarak et ürünlerinde uygulanan bir işlem olup, etin tuz, nitrat ve nitrit vb. birleşenleri içeren bir karışım ile muamele edilmesidir. Kullanılan nitrat ve nitritin et ürünlerinde antimikrobiyal ve antioksidan etkisi bulunmakta olup, ayrıca kürlenmiş et renginin ve lezzetinin oluşmasını sağladığı bilinmektedir. Kürlemede ülkelerin belirlediği kurallara ve ürün çeşidine bağlı olarak belirli konsantrasyonlarda nitrat ve nitritler kullanılmaktadır. Nitratlar ve nitritler suda, toprakta, havada, bitkilerde ve gıdalarda, kısacası her yerde bulunur. Gübre olarak, patlayıcı olarak ve özellikle *Clostridium botulinum*' a karşı gıdalarda koruyucu olarak kullanılırlar. Mikroorganizmalar tarafından azotun oksidasyonundan elde edilen doğal kimyasal maddelerdir. Nitratın ağız yoluyla indirgenmesi, nitritin en önemli kaynağıdır ve insanların toplam nitrit maruziyetinin yaklaşık %70-80' ini oluşturur.

Nitratlar ve nitritlerin, yüksek seviyelerde, yetişkinlerde kanser vakalarının artmasıyla ilişkilendirildiği; ikincil veya üçüncül aminlerle birleşerek N-nitroso türevleri oluşturduğu ve beyin tümörleri, lösemi ve nazofaringeal sorunların görülme sıklığının artmasına neden olabileceği belirtilmiştir (Gassara, Kouassi, Brar, & Belkacemi, 2016). Günümüzde katkı maddeleri kullanımı konusunda tüketicilerin sağlıkla ilgili endişeleri nedeniyle temiz etiketli ürünlere olan ilgi artmaktadır. Temiz etiketler, sentetik katkı maddesi içermemeyi, minimum işlem

görmeyi, doğal bir hammadde listesi sunmayı ve geleneksel işleme yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir (Asioli vd., 2017). Bu bağlamda özellikle, birçok gıda katkı maddesi içeren ve karmaşık üretim yöntemleri kullanılarak hazırlanan et ürünlerinin temiz etiketlenmesi büyük bir endişe kaynağıdır. Buna göre, gıda üreticileri sentetik kimyasallar yerine çevre dostu, doğal katkı maddelerinin kullanımını değerlendirmeye başlamıştır (Yong vd., 2021). Bu amaçla et ürünlerinde, kürlenme işleminde kullanılan nitrat ve nitritler yerine alternatif kürlenme yöntemleri araştırılmaktadır. Alternatif bitkisel nitrit ve nitrat kaynaklarının kullanımı, kimyasal alternatiflerin kullanımı, organik asitlerin, vitaminlerin ve mikrobiyal kaynakların kullanımı, ışınlama ve yüksek basınç teknolojilerinin kullanımı, enkapsülasyon uygulanması ve soğuk plazma teknolojilerinin kullanımı nitrat ve nitrit kullanımını azaltmaya yönelik uygulamalardan bazılarıdır (Gassara vd., 2016; Turp & Avcı, 2022). Bu araştırmada, nitrat ve nitritler hakkında bilgi, et ürünlerinde fonksiyonları ve alternatif bitkisel nitrit ve nitrat kaynaklarının kullanımı hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

2. NİTRİTLER VE NİTRATLAR

Nitratlar ve nitritler, farklı kimyasal yapılarda olsalar da doğal olarak azot ve oksijen içeren bileşikler olarak bulunurlar. Azot döngüsü her iki bileşiği de kapsamaktadır. Nitrat ve nitrit arasındaki kimyasal fark, bir oksijen atomunun daha bulunmasından kaynaklanır. Nitrit, bir kısım azot ve iki kısım oksijenden oluşur. Azot döngüsü nitritin (NO_2) nitrata (NO_3) oksidasyonunu içerir (Gassara vd., 2016).

Nitrit, *Clostridium botulinum* ve daha az ölçüde diğer bakterilere karşı etkili antimikrobiyal etkisi nedeniyle geleneksel olarak et ürünlerinin korunmasında kullanılmaktadır. Ayrıca, vakumlu ambalajda bekletilmiş ürünlerde *C. botulinum*

sporlarının gelişmesini önlemektedir (Majou & Christieans, 2018). Nitritin başlıca etkileri, koruyucu olarak etki etmesi nedeniyle et ürünlerinin raf ömrünü uzatması, tipik kürlenmiş renk ve lezzetin gelişimine katkıda bulunması ve oksidasyonu engellemesidir (Majou & Christieans, 2018; Sindelar & Milkowski, 2011). Ayrıca, nitrit, kalite gelişiminde rol oynayan amino peptidazlar ve lipazlar gibi kas enzimlerinin aktivitesini etkilemez (Motilva & Toldrá, 1993). Nitrat, bakteriyel nitrat redüktazın etkisiyle nitrit kaynağı olarak da kullanılabilir. Azot reaktivitesinin karmaşıklığı, et asidi ortamına nitrit eklenmesinin, NO ve NO₂ oksitleri ile dengede olan anhidrit N₂O₃ oluşturabilen nitroz asit oluşumuna yol açtığı anlamına gelmektedir (Flores & Toldrá, 2021).

NO' nun miyoglobin ve amino asitlerle reaktivitesi, kürlenmiş ette gözlemlenen değişikliklerin çoğunu oluşturur. Öte yandan, NO₂ üründe bulunan su ile reaksiyona girerek, ürüne hiç nitrat eklenmemiş olsa bile ürün analizinde görülebilen nitrat oluşturabilir. Oksijen mevcut olduğunda, NO oksitlenerek NO₂' ye dönüşebilir (Honikel, 2008; Toldrá, 2015). Nitrik oksit üretimi, kürlenmiş et rengini oluşturmak için miyoglobin ile reaksiyon için gereklidir. Ayrıca, nitritin lipit oksidasyonunu engelleme yeteneği (Ramarathnam, Rubin, & Diosady, 1991), genellikle, spesifik olmasa da, "kürlenmiş koku" üreten belirli bir aroma bileşiğinin oluşumuna atfedilen herhangi bir uçucu bileşikle ilişkilendirilmiştir. Kürleme maddelerinin aroma üzerindeki etkisi, oksidasyon reaksiyonları sırasında oluşan yeşil koku notaları üreten aldehit bileşikler ile etsi kokular üreten temel kükürt koku bileşikler arasındaki dengedir (Flores, 2018; Flores & Toldrá, 2021).

Nitrik oksidin, nitritin aktif antimikrobiyal bileşeni olduğu ve mikrobiyal DNA, protein ve lipitlere zarar verdiği iyi bilinmektedir. Nitritten kaynaklanan reaktif ara bileşikler, özellikle NO, reaktif oksijen türleriyle birlikte, N-nitrozilasyon,

S-nitrozilasyon, nitrozilhem oluşumu, disülfür oluşumu ve lipit peroksidasyonu yoluyla mikrobiyal moleküller ve yapılarla reaksiyona girerek DNA' ya, enzimler de dahil olmak üzere proteinlere ve lipitlere zarar verebilir (Fang, 1997; Hammes, 2012). Bununla birlikte, et ürünlerinin işlenmesi sırasında eklenen nitrit, bir dizi reaksiyonla tükenir veya belirli üretim aşamalarında kaybolur (Sindelar & Milkowski, 2011). Aynı zamanda, etin pH'ı, mevcut indirgeyici madde miktarı, sıcaklık ve süre dahil olmak üzere birçok faktör nitrit reaksiyonlarını etkilemektedir (Flores & Toldrá, 2021).

3. GIDA ÜRÜNLERİNDE KATKI MADDESİ OLARAK NİTRAT VE NİTRİT KULLANIMI

Nitrat ve nitritler işlenmiş gıdalarda koruyucu, et, kümes hayvanları, balık ve peynirde renk sabitleyici gıda katkı maddesi olarak kullanılır. Sodyum nitrit jambon, pastırma, sosis, sucuk gibi et ve et ürünlerinin, domuz eti ürünlerinin kürlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı balık ve kanatlı eti ürünleri de sodyum nitrit içeren salamuralarla kürlenir. Bu işlem, kuru kürleme, daldırma yöntemi ile kürleme veya kürleme bileşenlerinin doğrudan eklenmesini veya enjeksiyonunu ile uygulanabilmektedir. Kürleme karışımları genellikle tuz (sodyum klorür), nitrit ve nitratın sodyum veya potasyum tuzları ve baharatları içerir. Sodyum nitrit, renk sabitleyici görevi görür ve botulizm toksininin kaynağı olan *Clostridium botulinum* da dahil olmak üzere bakterilerin gelişmesini engeller. Nitrit, antibakteriyel özelliklere sahip oldukça güçlü bir indirgeyici maddedir. Ancak gıda maddelerinin korunması büyük ölçüde, kürleme işlemi sırasında kullanılan yüksek tuz konsantrasyonuna (nitrat içeren) bağlanabilmektedir. Ayrıca nitrat, mikrobiyolojik indirgeme yoluyla nitritin oluşabileceği bir rezervuar görevi

görebilir (Gassara vd., 2016; Pokorny, Maturana, Bortle, & Staff, 2000).

4. NİTRİT VE NİTRATLARIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ

4.1. Nitritlerin ve Nitratların Antioksidan Özellikleri

Nitritin en önemli özelliklerinden biri, oksidatif acılaşmanın gelişimini etkili bir şekilde geciktirme yeteneğidir. Bu oksidasyonun önlenmesi, güçlü bir oksidan olan tuzun varlığında bile gerçekleşir. Lipid oksidasyonu, et ve kümes hayvanı ürünlerinde kalitenin bozulmasının başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilir ve bu durum genellikle acılaşmaya ve ardından bayat tatların oluşmasına yol açar. Doymamış yağların oksidasyonu, kürlenmemiş ve pişmiş etlerde, kürlenmiş etlere göre daha hızlı gerçekleşir. Çünkü nitrik okside bağlı olmayan demir, bir oksidasyon katalizörü görevi görebilir (Gassara vd., 2016).

Nitritin antioksidan etkisi muhtemelen, hem proteinleri ve metal iyonlarıyla reaksiyonları, nitrik oksit tarafından serbest radikallerin şelatlanmasını ve antioksidan özelliklere sahip nitrizo- ve nitrosil bileşiklerinin oluşumunu içeren, kürlenmiş renk gelişiminden sorumlu olan aynı mekanizmalardan kaynaklanmaktadır (J. G. Sebranek, 2009). Nitritin, nispeten düşük seviyelerde kullanıldığında, ısıtılmış tatların gelişimini engellediği gösterilmiştir. Bir tür kızarmış et olan kavurmaya nitrit eklenmesi, nitrit eklenmemiş bir kontrol grubuna kıyasla, tiyobarbitürik asit, peroksit ve serbest yağ asitleri ile ölçülen oksidasyon seviyesini önemli ölçüde azaltabildiği belirtilmiştir. Nitrit ve nitratların antioksidan gücüne rağmen, endüstriler bu kimyasal ürünler için daha sağlıklı ve daha çevreci alternatifler bulmak zorundadır; zira bu ürünlerin dezavantajları avantajlarından çok daha fazladır (Gassara vd., 2016).

4.2. Nitritlerin ve Nitratların Antibakteriyel Aktivitesi

Nitritler ve nitratlar, kürlenmiş etlerde bakteriostatik ve bakterisidal ajanlar olarak önemli bir rol oynarlar. Gram negatif ve pozitif bakterilere karşı yüksek düzeyde antimikrobiyal etkili iken, maya ve küflere karşı etkisizdir (Öztürk, Serdaroğlu, & Ergezer, 2015). Nitrit, özellikle *Clostridium botulinum* olmak üzere anaerobik bakterilere karşı güçlü bir inhibitör etkiye sahiptir (Sofos, Busta, & Allen, 1979) ve *Listeria monocytogenes* gibi diğer mikroorganizmaların kontrolüne katkıda bulunur. Nitritin etkisi ve muhtemel inhibitör mekanizması, farklı bakteri türlerinde farklılık gösterir. Nitritin anti-botulinaj ajan olarak etkinliği, pH, NaCl konsantrasyonu, indirgeyiciler ve demir içeriği gibi çeşitli çevresel faktörlere bağlıdır. Ürün sıcaklığının uygun olmayan şekilde kullanılması durumunda kalıntı nitritin botulinum toksini önleyici etkiler açısından kritik öneme sahip olduğu ve ürünün depolanması sırasında kalıntı nitritin azalmasının, inhibe edici etkilerin de azalmasına yol açacağı sonucuna varmıştır. Diğer bileşikler de nitrit ve nitratlarla aynı antimikrobiyal özelliklere sahiptir. Fakat endüstrilerin bu bileşikler kullanmasının nedeni, renk ve et tadı üzerindeki etkileridir (Gassara vd., 2016).

4.3. Nitritlerin ve Nitratların Renk ve Tat Üzerindeki Etkisi

Kürlenmiş et ürünlerinin kırmızı rengin oluşması ve stabilitesinin sağlanması, et ürünlerinde nitrat ve nitritin önemli etkilerinden biridir (Öztürk vd., 2015). Kırmızı renk, NO-miyoglobinin (Fe^{2+}) oluşana kadar bir dizi karmaşık reaksiyon adımıyla gelişir ve bu kürlenmiş renk oluşumunun sağlanması için, nitratın mikrobiyal kaynaklı redüktaz enzimleri ile nitrite indirgenmesi gereklidir (Gassara vd., 2016; Honikel, 2008). Miyoglobinin (Mb), kaslarda üç durumda bulunur; kofaktör hem, merkezinde bir demir iyonu bulunan bir porfirin halkasıdır ve

farklı ligandları bağlar veya demir Fe^{2+} veya Fe^{3+} halinde bulunur. Doğal miyoglobinde, porfirin kısmı ligand bağlanmasında çevredeki proteinin amino asitleri tarafından desteklenir. "Orijinal" durumda, porfirin kofaktöründe Fe^{2+} bulunan miyoglobin, bir su molekülü ile herhangi bir liganda bağlanmaz. Oksijenin varlığında, miyoglobin bir O_2 molekülüne bağlanabilir ve parlak kırmızı olur. Demir iyonu Fe^{2+} durumundadır. Ancak oksijen ve nitrit gibi diğer oksitleyici maddeler Fe^{2+} yi Fe^{3+} ye oksitleyebilir. Oluşan metmiyoglobin (MetMb) kahverengidir. "Orijinal" miyoglobin, oksimiyoglobin (MbO₂) ve MetMb ette birlikte bulunur. Canlı bir hayvanın kasında çok az MetMb bulunur ve bu miktar, oksijenin kaybolmasıyla birlikte ölüm sonrasında artar; ancak yüksek oksijen içeriğine sahip etlere modifiye atmosfer ambalajlama (MAP) uygulandığında durum değişir (Gassara vd., 2016; Honikel, 2008).

Oksijen ve NO, iki atomlu moleküllerdir. Benzer bir iki atomlu molekül olan CO da miyoglobine çok sıkı bağlanır. Bazı ülkelerde (örneğin Amerika Birleşik Devletleri ve Norveç), %1-2 CO içeren modifiye atmosfer ambalajında et paketlenmesine izin verilir. İndirgeyici enzimler veya askorbat gibi indirgeyici maddelerle kimyasal reaksiyonlar yoluyla Fe^{3+} , Fe^{2+} ye indirgenir. N_2O_3 ’ ten oluşan NO, ısıya dayanıklı nitrosilmiyoglobin (NO-miyoglobin) oluşturmak için miyoglobine (Fe^{2+}) bağlanabilir. Oksimiyoglobin ısıya dayanıklı değildir ve daha hızlı ayrışır. Et rengi gri veya kahverengiye döner. Isıtma sırasında NO-miyoglobinin, protein kısmı denatüre olur ancak, kırmızı NO-porfirin halka sistemi (genellikle nitroso-miyokromojen olarak adlandırılır) hala mevcuttur ve $120 \pm 1^\circ C$ ye ısıtılmış et ürünlerinde bulunur. Bu ısıya dayanıklı kırmızı renk, bakteriyel bozulma sonucu değişir ve ultraviyole (UV) ışığında solar. Et ve et ürünlerinde kürlenmiş renk oluşumu reaksiyonları Şekil 1' de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Tüketici

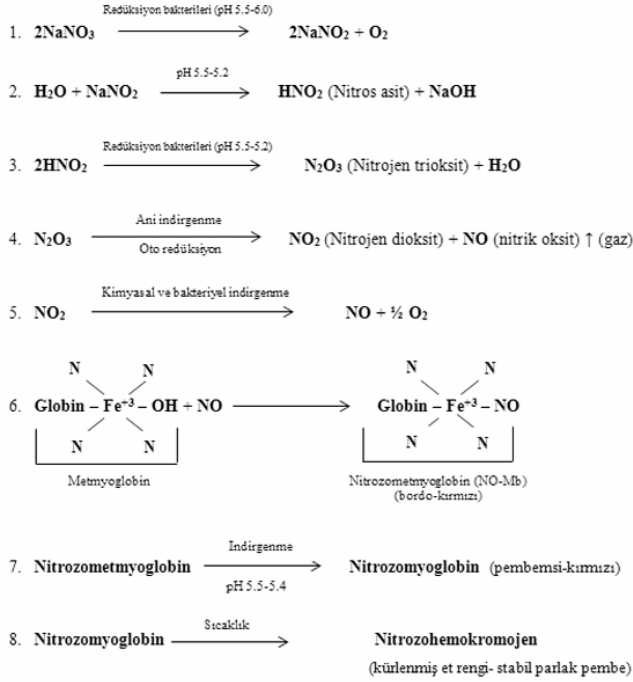
taze etteki bozulma nedeniyle oluşan renk değişimini fark ettiği için, oksimiyogloblin oluşumu önemlidir.

Nitrit, karakteristik kürlenmiş et lezzetinin oluşumundan da sorumludur. Ancak bu muhtemelen nitrit kimyasının en az anlaşılan yönüdür ve kürlenmiş etteki ayırt edici lezzet bileşenlerinin kimyasal yapısı üzerine çok fazla araştırma yapılmamıştır. Kürlenmiş ve pişirilmiş et ürünlerinde, lezzet farklılıklarının nitritin lipid oksidasyonunu baskılanmasından ve ‘warmed-over flavor’ (WOF; tekrar ısıtma sonucu meydana gelen oksidatif tat) oluşumundan kaynaklanabileceği (Öztürk vd., 2015; Shahidi & Shahidi, 1998), ancak diğer antioksidanların kürlenmiş et lezzeti üretmedikleri belirtilmiştir. Eğer nitrit gerçekten bazı uçucu lezzet faktörleri oluşturuyorsa, bu kürlenmiş ette nitritin bir başka reaksiyon ürünü anlamına gelmektedir (Gassara vd., 2016).

5. NİTRİT VE NİTRATLARIN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİSİ

Nitratlar ve nitritlerin sağlık üzerindeki etkileri farklıdır. İnsan sistemiyle ilgili olarak, nitratların başlıca toksik etkileri, endojen olarak nitritlere dönüşmesinden kaynaklanır. Nitritler, kırmızı kan hücrelerinin hemoglobinde bulunan demirle reaksiyona girerek kandaki hemoglobinin oksijen taşıma kapasitesini azaltır. Bu nedenle methemoglobinemi veya "mavi bebek sendromu" oluşumuna yol açar.

İçme suyundaki nitratların neden olduğu methemoglobinemi, çoğunlukla üç aydan küçük yaşta çocuklarda gözlemlenir. Suyun bakteriyel kontaminasyonu ve gastrointestinal enfeksiyonlar ve iltihaplanma ile nitrik oksit üretimi, methemoglobinemiye katkıda bulunabilecek başlıca faktörlerdir (Fan, 2011). Mavi bebek sendromu, kanlarında yüksek konsantrasyonda nitrat olan bebeklerin cildinin mavi renginden dolayı bu adı almıştır. Nitrat, hemoglobine (kandaki



Şekil 1. Et ve et ürünlerinde kürlenmiş renk oluşumu reaksiyonları (Honikel, 2008; Öztürk vd., 2015; Pegg & Shahidi, 2008)

oksijeni vücut dokularına taşıyan bileşik) bağlanır ve kimyasal olarak değişmiş hemoglobin (methemoglobin) oluşmasına neden olur. Bu da dokulara oksijen taşınmasını engeller ve cildin mavi renkte görünmesine neden olur. Mavi renklenme, mavi bebek sendromunun erken evrelerinde dudaklarda, burunda ve kulaklarda görülebilir ve daha şiddetli vakalarda periferik dokulara kadar yayılabilir (Gassara vd., 2016).

Dokuların oksijenlenmesinin azalması, çocuklar için koma ve ölüm gibi çok sayıda olumsuz sonuç doğurabilir. Methemoglobinemiye neden olan toksik nitrit dozları, vücut ağırlığının 0,4 mg/kg'ından 200 mg/kg'ından fazlasına kadar

değişmektedir. Bebekler için nitrit iyonu kuralı 3 ppm' dir. Daha yüksek seviyelerde nitrat veya nitritlere maruz kalmanın, yetişkinlerde kanser görülme sıklığının artmasıyla ve bazı durumlarda çocuklarda beyin tümörleri, lösemi ve nazofaringeal (burun ve boğaz) tümörlerinin görülme sıklığının artmasıyla ilişkili olduğu bulunmuştur. ABD Çevre Koruma Ajansı, literatürde nitrat veya nitritlere maruz kalmanın yetişkinlerde ve çocuklarda kanserle ilişkili olup olmadığı konusunda çelişkili kanıtlar olduğu sonucuna varmıştır (Gassara vd., 2016).

Gıdalarda yüksek oranda bulunan nitrit, sekonder aminler ile toksik, mutajenik ve kanserojenik olan N-nitrozamin oluşumuna sebep olmaktadır (Chatkitanan & Harnkarnsujarit, 2020; Ning vd., 2019; Öztürk vd., 2015; Turp & Avcı, 2022). Etin amin içeriği düşük olup, olgunlaşma ve fermantasyon süreci sonunda miktarı yükselmektedir. Kürleme işlemi uygulanan et ürünlerinde yüksek sıcaklık, pişirme metodu ve süresi, tuz miktarı ve düşük pH gibi etkenlerle nitrozaminler meydana gelmektedir (Öztürk vd., 2015; Turp & Avcı, 2022). Nitrit ve nitratların sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle et ve et ürünlerinden kullanımıyla ilgili ülkelere ve ürün çeşitlerine bağlı olarak bazı yasal sınırlamalar yer almaktadır. Ülkemizde et ve et ürünlerinde kullanılan nitrit miktarı; sterilize et ürünleri hariç en fazla 150 mg/kg, sadece ısıl işlem görmüş sucuklarda en fazla 150 mg/kg, sterilize et ürünleri için ise 100 mg/kg şeklinde belirlenmiştir (TGK, 2023).

6. SENTETİK NİTRİT VE NİTRAT YERİNE DOĞAL ALTERNATİFLER

Gıda endüstrisinde, sodyum nitrit (NaNO_2) ve potasyum nitrit (KNO_2) gibi sentetik nitritler, ucuz, kararlı, homojen ve hazırlanması kolay oldukları için sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak tüketicilerin organik gıdaların inorganik gıdalardan daha sağlıklı

ve besleyici olduğuna dair algıları, tüketicilerin sentetik nitrite maruz kalmasıyla ilgili önemli endişelere yol açmaktadır (Jo, Lee, Yong, Choi, & Jung, 2020). Organik gıda ile inorganik gıda arasında gerçekte hiçbir fark olmamasına rağmen, tüketiciler organik ve doğal gıdalar için %10-40 daha fazla ödemeye razıdır (J. G. Sebranek & Bacus, 2007). Bu nedenle, temiz etiketli gıda pazarı, sentetik katkı maddeleri yerine doğal katkı maddelerinin kullanımını vurgulamaktadır (Asioli vd., 2017).

Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı (IARC) tarafından nitritle kirlenmiş etin Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırılmasının ardından (IARC, 2018), birçok araştırmacı nitrit veya nitratın yerine geçebilecek alternatif katkı maddelerini belirlemek amacıyla çeşitli çalışmalar yapmıştır (Zhang vd., 2023). Bazı çalışmalar, sentetik nitritin bakteriyosinler, organik asitler, uçucu yağlar, vitaminler, sebze ekstraktları, baharatlar, bitkiler, meyveler gibi güçlü antimikrobiyal aktivite gösteren doğal bileşenler ile ikame edilme olasılığına odaklanmıştır (Flores & Toldrá, 2021). Çünkü bu maddeler veya içerikleri antioksidan ve/veya bakteriyostatik özellikler göstermiş ve nitrozamin oluşumunu önlemiştir. Bununla birlikte, nitritin kendisi, aynı anda birden fazla işlevi yerine getirebildiği için basit antioksidanlar veya antimikrobiyal maddeler kullanılarak değiştirilmesi zordur. Bu nedenle, gıda üreticileri, sentetik nitritin yerine doğal bitkilerden elde edilen nitrattan (NO_3^-) dönüştürülen nitritin (NO_2^-) kullanımını araştırmıştır (Gassara vd., 2016). Et ürünlerinde doğal bir madde olarak nitrat kullanımı yeni bir kavram değildir; yüzyıllar önce, et kürleme işlemlerinde potasyum nitrat (KNO_3) şeklinde doğal nitrat kullanılmıştır (Honikel, 2008). Bununla birlikte, modern teknoloji önemli ölçüde gelişmiştir ve artık nitratı daha kısa inkübasyon süreleriyle nitrite indirgemek için çeşitli starter kültürler kullanılmaktadır. Ayrıca, ürünün tadı gibi kalitesini, etkilemeyen doğal nitrit katkı

maddeleri geliştirilmektedir (J. Sebranek, Jackson-Davis, Myers, & Lavieri, 2012).

Nitrat doğal olarak toprakta, atmosferde, bitkilerde ve atık sulara bulunur. Bu doğal nitrat kaynakları arasında bazı bitkiler önemli miktarda nitrat içerir ve et ürünlerinde kullanımı kolaydır (Gassara vd., 2016). Bitkilerdeki genel nitrat konsantrasyonları Tablo 1' de gösterilmiştir. Kereviz, ıspanak, turp ve marul dahil olmak üzere birçok bitki 2.500 mg/kg'dan fazla nitrat içerir (Gassara vd., 2016; Schullehner, Hansen, Thygesen, Pedersen, & Sigsgaard, 2018). Bu bitkiler arasında kereviz, en kapsamlı şekilde incelenen bitkidir ve et ürünlerinin duyu özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği için ticari olarak kullanılmaktadır (J. Sebranek vd., 2012). Literatürde, kereviz tozu da dahil olmak üzere çeşitli nitrat kaynakları kullanılarak et ürünlerinin üretildiği çalışmalar yer almaktadır. Çalışmaların çoğunda nitrati nitrite indirmek için hem nitrat içeren bitkiler hem de bir starter kültür (nitrat indirgeyici bakteriler) kullanılmıştır. Kim vd. (2019), pazının starter kültürle fermente edilip, pişmiş bonfile jambonda kullanıldığında renk (özellikle kırmızılık) ve lipid oksidasyonu üzerinde olumlu etkiler olduğunu bildirmiştir. Pişmiş soslerde, kereviz tozu (%0,8) ilavesinin depolama sırasında kalite bozulmasını etkili bir şekilde engellediği rapor edilmiştir (Jin, Choi, Yang, Park, & Yim, 2018). Choi vd. (2017), askorbik asit ile kırmızı pancardan önceden dönüştürülmüş nitrit (%10) içeren bir et emülsiyonunun, sodyum nitrit kullanılarak hazırlanan emülsiyonla benzer kalitede olduğunu göstermiştir. Önemli olarak, doğal nitrit kaynakları, et ürünlerinde mikrobiyal gelişmeyi ve kaliteyi kontrol etmek için etkilidir. Golden, McDonnell, Sheehan, Sindelar, and Glass (2014), önceden dönüştürülmüş kereviz tozunun (nitrit içeriği: 80 mg/kg), şarküteri tarzı hindilerde *L. monocytogenes*' in gelişmesini engellediği sonucuna varılmıştır.

Tablo 2' de görülebileceği gibi, bitki ekstraktlarının kullanımının faydaları, sentetik nitrit/nitratin doğrudan eklenmesinden kaçınmakla ilgilidir. Böylece E numaralarının çıkarılmasına ve temiz etiketli et ürünleri elde edilmesine olanak tanır. Bu olasılık, temiz etiketli gıdalar için ilgili pazar nedeniyle üreticiler için caziptir. Ayrıca, tüketiciler bunları olumsuz kimyasal bileşenler veya katkı maddeleri olarak algılamazlar. Bu ürünler, renk, aroma ve oksidasyon açısından geleneksel olarak kürlenmiş ürünlerle aynı organoleptik özelliklere ulaşabilir. Bitki ekstraktının kendine özgü aroma ve pigment profili, bitkisel kaynaklara ve bitkinin anatomik kısmına bağlı olarak nitrat konsantrasyonundaki değişkenlik, nitrat redüktaz aktivitesine sahip bir bakterinin kullanılması gerekliliği ve ürün çapına bağlı olarak 38-42 °C' lik bir inkübasyon sıcaklığı gibi çeşitli sınırlamalar gözlemlenmektedir (Rivera, Bunning, & Martin, 2019). Dahası, yeterli nitrit üretilmezse, bu et ürünlerindeki gıda güvenliği etkileri geleneksel olarak kürlenmiş et ürünlerindekiyle aynı olmayabilir. Örneğin; 20.000 ppm' e kadar nitrit içeren %0,3 oranında önceden indirgenmiş kereviz ilavesinin, bir et formülasyonunda en fazla 60 ppm' lik düşük bir nitrit içeriği ile sonuçlanabileceği bildirilmiştir (Toldrá, 2015). Aynı tutarlı güvenlik seviyesine ulaşmak için birçok çalışma, kurutulmuş sirke, kültürlü şeker-sirke karışımı ve limon-sirke karışımı, kiraz, limon ve sirke tozu karışımı ve kültürlü şeker ve sirke karışımları gibi “doğal kaynaklardan” antimikrobiyallerin eklenmesini ele almıştır (Flores & Toldrá, 2021).

Bitkisel kaynaklardan elde edilen nitrat iki şekilde kullanılabilir. Birincisi, üretim sürecinde bitki bileşeninin ve starter kültürün doğrudan salamuraya veya ürüne eklenmesidir. Bu yöntemde, kültür tarafından nitrattan yeterli nitrit oluşumunu sağlamak için yeterli bir inkübasyon süresi gerektirmektedir. Ancak, üretilen nitrit miktarı bilinmediği ve inkübasyon koşullarına bağlı olduğu için bu yöntemin kullanımı zordur (Yong

vd., 2021). Bu nedenle, endüstriler farklı yöntemler kullanmayı tercih ederler. İkinci yöntem ise, nitrit üretmek için önceden starter kültürle inkübe edilmiş olan ‘kültürlenmiş’, ‘ön fermente edilmiş’ veya ‘önceden dönüştürülmüş’ nitrat içeren bitkisel kaynağın kullanımıdır. Önceden nitratin nitrite dönüştürüldüğü bitki tozunun kullanımı, içerdiği nitrit miktarı bilindiği için kolaydır (Flores & Toldrá, 2021). J. Sebranek vd. (2012) yılında yapılan bir araştırmaya göre, önceden işlenmiş bitkisel ürünlerin tipik olarak yaklaşık 15.000–20.000 mg/kg nitrit içerdiği tespit edilmiştir.

Tablo 1. Farklı bitkilerdeki genel nitrat içeriği (mg/100 g taze ağırlık) (Gassara vd., 2016; Schullehner vd., 2018; Yong vd., 2021)

Nitrit içeriği	Bitki çeşidi
>2.500	Kereviz, tere, marul, ıspanak, roka
1.000-2.500	Çin lahanası, hindiba, pırasa, maydanoz
500-1.000	Şalgam, kara lahanası, lahana
200-500	Havuç, salatalık, kabak, brokoli
<200	Patates, domates, soğan, patlıcan, mantar, kuşkonmaz

Eisinaite, Tamkutė, Vinauskienė ve Leskauskaitė (2020) yaptıkları çalışmada soğuk tütsülenmiş sosislerin renk oluşumu ve mikrobiyolojik özelliklerine, nitrat kaynağı olarak kerevizin (%2.58) ve *S. xylosus* and *Pediococcus pentosaceus* starter kültürlerinin etkisini incelemişlerdir. Ozaki vd. (2021) fermente kuru sosis üretiminde, doğal nitrat kaynağı olarak pancar (%0.5, %1) ve turp (%0.5, %1) ile *S. carnosus* kültürünü kullanmışlardır. Sucu ve Turp (2018) sucukta nitrit alternatifi olarak pancar tozu (%0.12, %0.24 ve %0.35) ve *S. carnosus*, *P. acidilactici* ve *Lactobacillus sakei* kültürlerinin etkisini araştırmışlardır.

Pan, She, Hu, Shi ve Zhang (2019) %0.2 bambu yaprağı özünün, domuz jambonuna eklenmesiyle nitritin N-nitrozaminlere dönüşümünün etkili bir şekilde durdurabildiğini bulmuşlardır. Wang, Huang ve Chai (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, yarı kurutulmuş fermente sosisin hazırlanmasında nitrit yerine gül ekstraktı kullanılmış ve elde edilen sosisin

kalitesi, 150 mg/kg sodyum nitrit içeren sosise kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmiştir. En uygun kombinasyonun %10 gül ekstraktı ve 80 mg/kg sodyum nitritten oluştuğu tespit edilmiştir. Zhou, Wang ve Wang (2020) sosislerde %0-%0.5 oranlarında biberiye ekstraktı, üzüm çekirdeği ekstraktı, yeşil çay polifenolü ve %0.015 sodyum nitrit kullandıkları çalışmada, %0.5 oranında kullanılan yeşil çay polifenolünün sosislerde kalıntı nitrit, nitrozamin miktarı ve TBARS sonuçları açısından olumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

7. SONUÇ

Nitrit, et ve et ürünlerinde teknolojisinde hayati bir katkı maddesidir. Bugüne kadar, et işlemede nitritin çoklu işlevleri tamamen diğer katkı maddeleriyle değiştirilememiştir. Nitrit veya nitrat oksitin kullanımının insanlar için güvenli olmasını sağlamak amacıyla, çeşitli ülkeler ve bölgeler tarafından düzenlemeler ve yönergeler uygulanmıştır. Et işlemede nitriti azaltmak veya kısmen değiştirmek için alternatif yöntemler bulunmakta olup, bunlar arasında alternatif katkı maddelerinin kullanımı bu alanda birçok araştırma yapıldığı için, et işlemede nitriti değiştirmenin en yaygın ve başarılı yöntemi olabileceği düşünülmektedir. Ancak, nitritin doğrudan veya dolaylı olarak yerine konmasıyla üretilen et ürünlerinin kalitesi veya güvenliği, ayrı ayrı başarıyla ele alınabilse de tam anlamıyla hiçbir bileşen veya teknoloji bu ürünlerin hem kalitesini hem de güvenliğini ele almanın birleşik etkisini gösterememiştir. Bu nedenle, etiketlerin temizliğini artırabilen ve yüksek kaliteli et veya et ürünlerinin üretimine katkıda bulunabilen alternatif yöntemlerin ve alternatif bileşenlerin üzerine yapılan araştırmaların arttırılması ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Tablo 2. Bitki ekstraktlarının nitrit ve/veya nitrat kaynağı olarak kullanımına ilişkin avantajlar ve dezavantajlar (Flores & Toldrá, 2021)

Avantajlar	Dezavantajlar
Kürlenmiş ürünün duyusal özelliklerini (renk, aroma) geliştirir.	Sebze aroma bileşikleri ürünün lezzetini bozabilir.
Oksidasyonu önler.	Sebzeden gelen pigmentler ürünün rengini bozabilir.
Temiz etiketlidir (E numaraları içermez).	Sebze kaynağına (coğrafi ve bölge) bağlı olarak nitrat konsantrasyonunda değişkenlik olabilir.
Organik gıdalarla uyumludur.	Nitrat redüktaz aktivitesine sahip bakterilerle fermentasyon gerektirir.
Bitkisel kaynak yeterli miktarda nitrit içeriyorsa gıda güvenliğine katkıda bulunur.	Gıda güvenliği doğrulanmalıdır. Antimikrobiyallerle desteklenmesi gerekebilir. Nitrozamin oluşumu riski devam etmektedir. Sebzeden kaynaklanan kimyasal tehlikeler riski (örneğin mikotoksinler, ağır metaller, organik kirleticiler) Sebzeden kaynaklanan alerjenik potansiyel riski (örneğin kereviz)

KAYNAKLAR

- Asioli, D., Aschemann-Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food research international*, 99, 58-71.
- Chatkitanan, T., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Development of nitrite compounded starch-based films to improve color and quality of vacuum-packaged pork. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100521.
- Choi, Y.-S., Kim, T.-K., Jeon, K.-H., Park, J.-D., Kim, H.-W., Hwang, K.-E., & Kim, Y.-B. (2017). Effects of pre-converted nitrite from red beet and ascorbic acid on quality characteristics in meat emulsions. *Korean journal for food science of animal resources*, 37(2), 288.
- De Jonge, J., & Van Trijp, H. C. (2013). Meeting heterogeneity in consumer demand for animal welfare: A reflection on existing knowledge and implications for the meat sector. *Journal of agricultural and environmental ethics*, 26(3), 629-661.
- Eisinaite, V., Tamkutė, L., Vinauskienė, R., & Leskauskaitė, D. (2020). Freeze-dried celery as an indirect source of nitrate in cold-smoked sausages: Effect on safety and color formation. *Lwt*, 129, 109586.
- Fan, A. (2011). Nitrate and nitrite in drinking water: a toxicological review.
- Fang, F. C. (1997). Perspectives series: host/pathogen interactions. Mechanisms of nitric oxide-related antimicrobial activity. *The Journal of clinical investigation*, 99(12), 2818-2825.

- Flores, M. (2018). Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products. *Meat Science*, 144, 53-61.
- Flores, M., & Toldrá, F. (2021). Chemistry, safety, and regulatory considerations in the use of nitrite and nitrate from natural origin in meat products-Invited review. *Meat Science*, 171, 108272.
- Gassara, F., Kouassi, A. P., Brar, S. K., & Belkacemi, K. (2016). Green alternatives to nitrates and nitrites in meat-based products—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(13), 2133-2148.
- Golden, M. C., McDonnell, L. M., Sheehan, V., Sindelar, J. J., & Glass, K. A. (2014). Inhibition of *Listeria monocytogenes* in deli-style Turkey breast formulated with cultured celery powder and/or cultured sugar–vinegar blend during storage at 4 C. *Journal of Food Protection*, 77(10), 1787-1793.
- Hammes, W. P. (2012). Metabolism of nitrate in fermented meats: The characteristic feature of a specific group of fermented foods. *Food microbiology*, 29(2), 151-156.
- Honikel, K.-O. (2008). The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products. *Meat Science*, 78(1-2), 68-76.
- IARC. (2018). Red Meat and Processed Meat Volume 114. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Retrieved from <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono114.pdf>.<https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono114.pdf>.

- Jakobsen, J., & Hansen, A. (2020). Geographies of meatification: an emerging Asian meat complex. *Globalizations*, 17(1), 93-109.
- Jin, S.-K., Choi, J. S., Yang, H.-S., Park, T.-S., & Yim, D.-G. (2018). Natural curing agents as nitrite alternatives and their effects on the physicochemical, microbiological properties and sensory evaluation of sausages during storage. *Meat Science*, 146, 34-40.
- Jo, K., Lee, S., Yong, H. I., Choi, Y.-S., & Jung, S. (2020). Nitrite sources for cured meat products. *Lwt*, 129, 109583.
- Kim, T.-K., Hwang, K.-E., Song, D.-H., Ham, Y.-K., Kim, Y.-B., Paik, H.-D., & Choi, Y.-S. (2019). Effects of natural nitrite source from Swiss chard on quality characteristics of cured pork loin. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 32(12), 1933.
- Majou, D., & Christeans, S. (2018). Mechanisms of the bactericidal effects of nitrate and nitrite in cured meats. *Meat Science*, 145, 273-284.
- Motilva, M.-J., & Toldrá, F. (1993). Effect of curing agents and water activity on pork muscle and adipose subcutaneous tissue lipolytic activity. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 196(3), 228-232.
- Ning, C., Li, L., Fang, H., Ma, F., Tang, Y., & Zhou, C. (2019). l-Lysine/l-arginine/l-cysteine synergistically improves the color of cured sausage with NaNO₂ by hindering myoglobin oxidation and promoting nitrosylmyoglobin formation. *Food chemistry*, 284, 219-226.
- Ozaki, M. M., Munekata, P. E., Jacinto-Valderrama, R. A., Efraim, P., Pateiro, M., Lorenzo, J. M., & Pollonio, M. A. R. (2021). Beetroot and radish powders as natural nitrite

- source for fermented dry sausages. *Meat Science*, 171, 108275.
- Öztürk, B., Serdaroğlu, M., & Ergezer, H. (2015). Et ve et ürünlerinde nitrit-nitrat; kullanım avantajları, yasal sınırlamalar ve güncel alternatif yaklaşımlar. *Akademik Gıda*, 13(3), 257-264.
- Pan, J., She, X., Hu, L., Shi, L., & Zhang, H. (2019). The application of bamboo leaf extracts in cured foods. *Journal of Bamboo Research*, 38(2), 57-61.
- Pegg, R. B., & Shahidi, F. (2008). Nitrite curing of meat: The N-nitrosamine problem and nitrite alternatives: John Wiley & Sons.
- Pokorny, L., Maturana, I., Bortle, W. H., & Staff, U. b. (2000). Sodium nitrate and nitrite. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Ramarathnam, N., Rubin, L. J., & Diosady, L. L. (1991). Studies on meat flavor. 1. Qualitative and quantitative differences in uncured and cured pork. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(2), 344-350.
- Rivera, N., Bunning, M., & Martin, J. (2019). Uncured-labeled meat products produced using plant-derived nitrates and nitrites: Chemistry, safety, and regulatory considerations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(29), 8074-8084.
- Schullehner, J., Hansen, B., Thygesen, M., Pedersen, C. B., & Sigsgaard, T. (2018). Nitrate in drinking water and colorectal cancer risk: A nationwide population-based cohort study. *International journal of cancer*, 143(1), 73-79.
- Sebranek, J., Jackson-Davis, A., Myers, K., & Lavieri, N. (2012). Beyond celery and starter culture: Advances in

- natural/organic curing processes in the United States. *Meat Science*, 92(3), 267-273.
- Sebranek, J. G. (2009). Basic curing ingredients. In *Ingredients in meat products: Properties, functionality and applications* (pp. 1-23): Springer.
- Sebranek, J. G., & Bacus, J. N. (2007). Cured meat products without direct addition of nitrate or nitrite: what are the issues? *Meat Science*, 77(1), 136-147.
- Shahidi, F., & Shahidi, F. (1998). *Flavor of meat, meat products and seafoods* (Vol. 429): Blackie academic & professional London.
- Sindelar, J. J., & Milkowski, A. L. (2011). Sodium nitrite in processed meat and poultry meats: a review of curing and examining the risk/benefit of its use. *American Meat Science Association White Paper Series*, 3, 1-14.
- Smith, S. B., Gotoh, T., & Greenwood, P. L. (2018). Current situation and future prospects for global beef production: overview of special issue. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 31(7), 927.
- Sofos, J. N., Busta, F. F., & Allen, C. (1979). Botulism control by nitrite and sorbate in cured meats: a review. *Journal of Food Protection*, 42(9), 739-770.
- Sucu, C., & Turp, G. Y. (2018). The investigation of the use of beetroot powder in Turkish fermented beef sausage (sucuk) as nitrite alternative. *Meat Science*, 140, 158-166.
- Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği, (2023).
- Toldrá, F. (2015). *Fermented Meat and Poultry*: Wiley Online Library.

- Turp, G. Y., & Avcı, T. (2022). Current approaches to nitrite reduction methods in meat products and their potential for transfer to industry.
- Wang, Y., Huang, Y.-c., & Chai, L. (2021). The effect of substituting nitrite with rose extract on the quality of semi-dried fermented sausage.
- Yong, H. I., Kim, T.-K., Choi, H.-D., Jang, H. W., Jung, S., & Choi, Y.-S. (2021). Clean label meat technology: Pre-converted nitrite as a natural curing. *Food Science of Animal Resources*, 41(2), 173.
- Zhang, Y., Zhang, Y., Jia, J., Peng, H., Qian, Q., Pan, Z., & Liu, D. (2023). Nitrite and nitrate in meat processing: Functions and alternatives. *Current Research in Food Science*, 6, 100470.
- Zhou, Y., Wang, Q., & Wang, S. (2020). Effects of rosemary extract, grape seed extract and green tea polyphenol on the formation of N-nitrosamines and quality of western-style smoked sausage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(6), e14459.

IMPACT OF UHT AND PASTEURIZATION PROCESSES ON THE STABILITY OF VITAMINS B2 (RIBOFLAVIN) AND B12

Aslıhan TÜĞEN¹

1. INTRODUCTION

Dairy products, an important part of human nutrition, are rich in Riboflavin (B2) and Cobalamin (B12). Indeed, a comprehensive household survey conducted in Poland showed that although this food group contributed only 9.1% to daily dietary energy intake, it alone provided 28.1% of riboflavin intake and 26.1% of cobalamin intake (Górska-Warsewicz, Rejman, & Laskowski, 2019). Another study conducted in Canada showed that milk and its alternatives account for 24.43% of riboflavin and 27.73% of vitamin B12 in the adult diet (Auclair, Han, & Burgos, 2019). Cobalamin is a micronutrient that cannot be synthesised in the human body and can only be obtained from animal-based foods (Moravcová, Siatka, & Krčmová, 2024). Inadequate intake of these vitamins, especially in groups with limited animal food consumption, paves the way for haematological disorders, anaemia, and irreversible neurological damage (Gharibzahedi et al., 2023).

A direct relationship has been reported between dairy consumption levels and individuals' vitamin status. Biomarker analyses conducted by Cifelli, Agarwal, and Fulgoni (2022) showed that increased consumption of milk and yoghurt was associated with higher serum B12 and folate levels and a

¹ (PhD Student), Afyon Kocatepe University Institute of Sciences, Department of Food Engineering, Afyonkarahisar, Türkiye, ORCID: 0000-0001-5344-2804.

corresponding reduction in deficiency risk ranging from 9% to 57%. One of the most practical ways to prevent calcium and vitamin D deficiencies, which are common in childhood, is to fortify dairy products (Wozniak et al., 2022). While essential nutrients such as potassium and choline can be met through regular milk consumption, magnesium and calcium deficiencies are among the risks created by irregular dairy consumption (Hess, Cifelli, and Fulgoni, 2020). Therefore, regardless of the heat treatment applied, regular consumption of milk contributes to overall nutritional adequacy.

By contrast, vitamin B12 exhibits variable stability in foods, as it is sensitive to environmental conditions such as processing temperature, pH, light exposure, and the presence of oxidising agents (Temova Rakuša et al., 2022). While the majority of studies in the literature have focused on the destructive effects of light, the effects of thermal history during storage and interactions with other components remain a less explored area. The cyanocobalamin form, in particular, exhibits a tendency to deteriorate when combined with other B group vitamins or excipients (Temova Rakuša et al., 2022). Therefore, in food technology, it is necessary to investigate the effects of thermal processing and storage conditions on vitamin loss in order to maintain product quality. The differences in resistance to environmental stress factors exhibited by different forms of vitamin B12 necessitate the optimisation of production processes.

In this context, this study aims to comparatively examine the effects of different heat treatment standards (pasteurisation, UHT) and storage conditions, commonly applied in the dairy industry, on the stability of Riboflavin (B2) and Cobalamin (B12) vitamins. In addition, it aims to determine the kinetic relationship between vitamin losses and changes in the physicochemical structure of milk, the concept of “thermal history” and “dark

reactions” that develop during storage, in order to optimise industrial production processes and preserve product quality.

2. BIOCHEMICAL STRUCTURE AND THERMAL CHARACTERISTICS OF VITAMINS

Riboflavin (vitamin B2) exhibits a tendency for self-association in aqueous environments due to the π -stacking interactions of its isoalloxazine rings in its crystal structure. This situation stands out as the fundamental thermodynamic factor limiting the molecule's solubility (Ulmann et al., 2024). Crystallographic analyses have revealed that the distance between these stacked units varies between 3.643 and 3.313 Å and that the ribityl chains are positioned in a “syn” orientation (Ulmann et al., 2024). When the thermal processing dynamics of milk were examined, it was observed that the Riboflavin molecule was 97.8% preserved under 15-second pasteurisation conditions at 72°C and largely retained its structure (Shuang et al., 2024). However, when the system temperature exceeds the 90°C threshold, a significant increase in furosine levels in the environment is observed, and this point is considered a critical thermal limit at which molecular degradation accelerates (Shuang et al., 2024). Upon reaching 100°C, limited lactosylation reactions begin in the α -lactalbumin and β -lactoglobulin proteins (), irreversibly altering the chemical stability of the protein matrix in which the vitamin is present (Shuang et al., 2024).

Cobalamin (vitamin B12), unlike other B vitamins, possesses a large corrin ring containing a cobalt atom at its centre. This structural feature makes the molecule thermodynamically more sensitive to environmental stress factors (Temova Rakuša et al., 2022). When examining molecular degradation mechanisms, the hydrolysis of the phosphate bond in the nucleotide moiety is a critical breaking point, resulting in the formation of biologically

inactive degradation products (Temova Rakuša et al., 2022). Although the cyanocobalamin form is relatively stable, it rapidly loses its molecular integrity in the presence of excipients such as dextrose or sucrose and under high temperature conditions (Temova Rakuša et al., 2022). During the storage of heat-treated milk and cream products, vitamin B12 is the compound that struggles most to maintain its concentration compared to riboflavin, thiamine (B1) and vitamin E. Time-dependent loss rates are evidence of this molecule's sensitivity to its "thermal history" (Lalwani, Lewerentz, Håkansson, et al., 2024).

The aqueous phase of milk (serum) and the microenvironments surrounding fat globules present different physicochemical conditions that affect the stability of vitamins. When temperatures exceed 124°C in direct heating systems, a decrease in ionic calcium levels is observed, along with an increase in the size of fat globules and the formation of protein-fat aggregates (Lalwani, Lewerentz, & Håkansson, 2024). These physical changes alter the surface areas with which vitamins interact and molecular diffusion. The behaviour of riboflavin in the aqueous phase is dependent on solubility limits due to the stacking tendency of isoalloxazine units, while disruptions in the structure of fat globules weaken the steric protection of vitamins (Ulmann et al., 2024; Lalwani, Lewerentz, & Håkansson, 2024). When indirect heating methods are applied, even if physical stability is maintained on the production day, signs of instability appear in the serum phase after 28 days of storage, accelerating the degradation kinetics of vitamins (Lalwani, Lewerentz, & Håkansson, 2024).

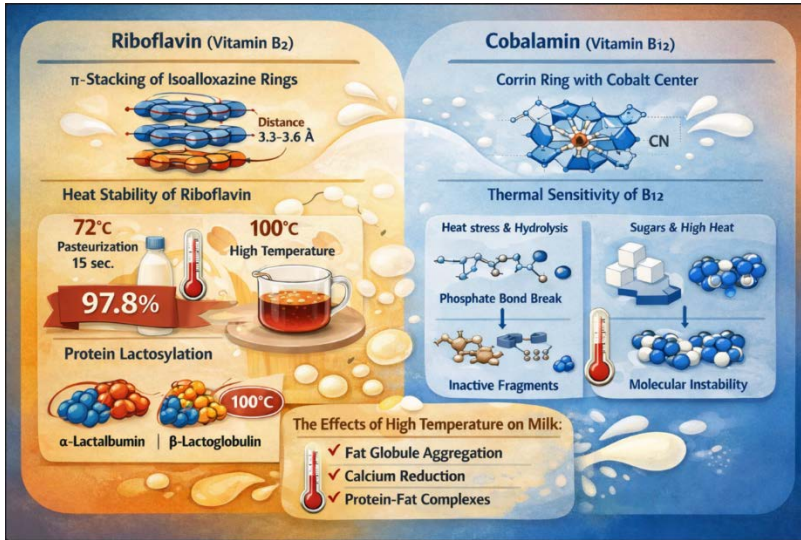


Figure 1. Biochemical Structure and Thermal Characteristics of Vitamins

3. APPLIED THERMAL TREATMENTS: PASTEURISATION VS. UHT

The effect of thermal processes applied in the dairy industry on micronutrients is directly linked not only to the temperature level but also to the exposure time and the thermodynamic structure of the process. As is well known, short-term HTST pasteurisation at 72°C largely preserves the bioactive components of milk, but when the temperature exceeds a certain threshold, antioxidant and bacteriostatic capacity decrease and thermal damage indicators increase significantly (Shuang et al., 2024). Comparative studies on an industrial scale have revealed that, contrary to expectations, high pasteurisation processes cause a higher rate of loss in vitamins B1, B2, and B12 compared to ultra-high temperature (UHT) or extended shelf life (ESL) processes (Lalwani et al., 2024). Therefore, in calculating the total thermal load, it is not only the maximum temperature

reached but also the thermal stress distributed throughout the process that is decisive.

When examining the differences between direct (steam injection) and indirect (plate/tube) UHT systems, no statistically significant difference was found between the two methods in terms of vitamin degradation (Lalwani, Lewerentz, & Håkansson, 2024). However, the direct steam injection (DSI-IUHT) method reduces the denaturation of whey proteins by 27.52% compared to the indirect UHT method and maintains the physicochemical quality of the milk at a level closer to that of the raw material (Han et al., 2023). In direct heating systems, a slight increase in milk pH and a decrease in ionic calcium levels were observed, while an increase in fat globule size and aggregate formation were detected at high temperatures (Lalwani, Lewerentz, & Håkansson, 2024). Although indirect heating systems provide physical stability on the day of production, signs of physical instability in milk become more pronounced at the end of the 28-day storage period (Lalwani, Lewerentz, & Håkansson, 2024).

The degradation kinetics determining the fate of vitamins during thermal processing show a high degree of consistency between laboratory models and industrial-scale production data. Kinetic models based on the thermal degradation of vitamins B1, B2, and E can predict losses in industrial processes with a very low deviation rate of -1.1% to +3% (Lalwani, Lewerentz, Löfgren, et al., 2024). These data show that vitamin loss is not random and that the energy applied leads to predictable destruction according to mathematical models. As the intensity of the thermal process increases, an increase in the ratio of saturated fatty acids such as hexadecanoic and octadecanoic acids is observed, and changes occur in the metabolite profile of the milk (Cheng et al., 2023). Therefore, the difference in energy input affects not only vitamin levels but also changes the overall molecular structure of milk.

Storage is at least as important as heat treatment in determining how stable the remaining vitamins are after processing. Studies show that in heat-treated milk and cream, longer storage causes vitamin B12 to decrease much faster than vitamins B1 and B2 (Lalwani, Lewerentz, Håkansson et al., 2024). This higher sensitivity of vitamin B12 becomes more noticeable when physical changes occur during the later stages of storage, especially in indirectly heated products. Similar results have been observed in fruit nectars, where longer storage reduces bioactive compounds and antioxidant activity, regardless of whether HTST or UHT treatment is used (Polak et al., 2024). In this context, thermal stress should not be seen mainly as a direct cause of vitamin loss, but as a key factor that weakens the product's resistance to oxidative damage over its shelf life.

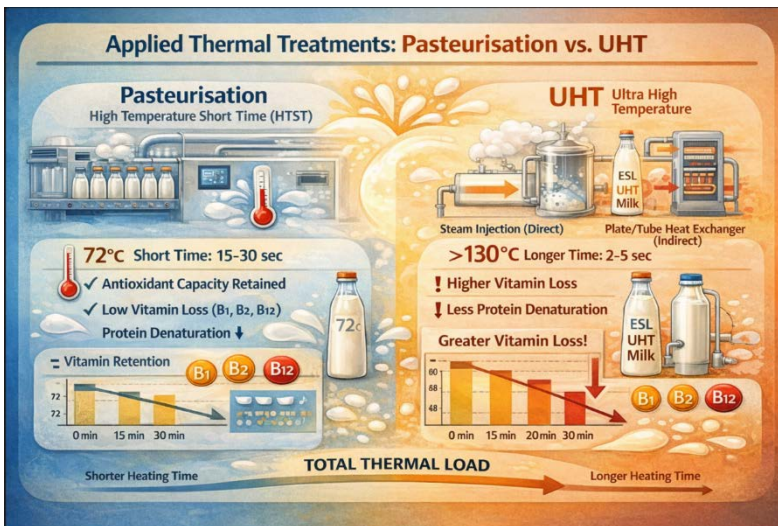


Figure 2. Pasteurisation vs. UHT

4. VITAMIN B2 (RIBOFLAVIN): THERMAL DEGRADATION IN THE DARK

Riboflavin is known to be resistant to heat; however, during the UHT process, where temperatures of 135–150°C are applied, it undergoes hydrolytic degradation because its molecular stability is disrupted. Studies using synchronised fluorescence spectroscopy have shown permanent structural damage at the 410 nm emission peak in UHT-treated milk (Ali et al., 2019). The high energy produced during heating weakens the bonds between the isoalloxazine ring and the ribityl side chain of the vitamin, causing the molecule to react with other substances in its surroundings. In pasteurised and boiled milk, these changes can be reversed after cooling, but the high enthalpy involved in UHT processing leads to irreversible deformation of protein–vitamin complexes (Ali et al., 2019). In addition, Maillard reaction products formed at high temperatures modify the chemical structure of the milk matrix, creating conditions that further reduce the stability of the vitamin.

Even without light exposure, free radicals and oxidised antioxidants formed at high temperatures can attack the riboflavin molecule and start a degradation process known as the “dark reaction”. Compounds that are oxidised by thermal stress during food processing remain chemically active during storage and slowly damage the structure of the vitamin (Poljšak et al., 2021). This process is not limited to an immediate loss during processing; instead, it occurs together with increased proteolysis and plasmin activity that continues throughout storage, reducing the stability of milk (Fan et al., 2024). Physical changes observed during the storage of ultra-instant UHT (UI-UHT) milk, such as gelation and sedimentation, suggest that the protein networks that normally protect the vitamin are broken down, leaving riboflavin more exposed and vulnerable to degradation (Fan et al., 2024).

The negligible loss of vitamin B2 in pasteurised milk is due to the synergistic effect of the low temperature parameter and the short exposure time. It was found that the preservation rate of riboflavin after HTST (72°C/15 sec) treatment was 97.8%, and this loss was statistically insignificant (Shuang et al., 2024). The temperature of 72°C does not reach the activation energy required to break the covalent bonds in the Riboflavin molecule, and the 15-second duration is insufficient for thermal diffusion to break down the molecule. Kinetic modelling studies confirm that the thermal degradation of vitamins B1, B2, and E in laboratory models corresponds exactly to that at industrial scale and that pasteurisation conditions remain below the threshold value required to initiate degradation kinetics (Lalwani et al., 2024). Conversely, when the temperature exceeds 90°C, a rapid decline in antioxidant capacity and bioactive components begins (Shuang et al., 2024).

Changes in the physical structure of milk and the homogenisation techniques applied also determine the vitamin's resistance to "dark reactions". The (ultra) high-pressure homogenisation ((U)HPH) process increases light scattering by reducing the particle size in milk, and this physical change indirectly reduces the rate of riboflavin degradation by 50% (Sharabi et al., 2018). Unlike traditional thermal treatments, non-thermal technologies such as high hydrostatic pressure (HPP) and pulsed electric field (PEF) preserve vitamin B2 and other bioactive proteins (IgG, lactoferrin) at much higher levels than UHT processing while reducing the microbial load (Chen et al., 2024; Pegu & Arya, 2023). Therefore, the loss of vitamin B2 is not solely a thermal outcome but a multi-parameter process shaped by the combination of the milk's physical matrix, the applied pressure, and molecular interactions during storage.

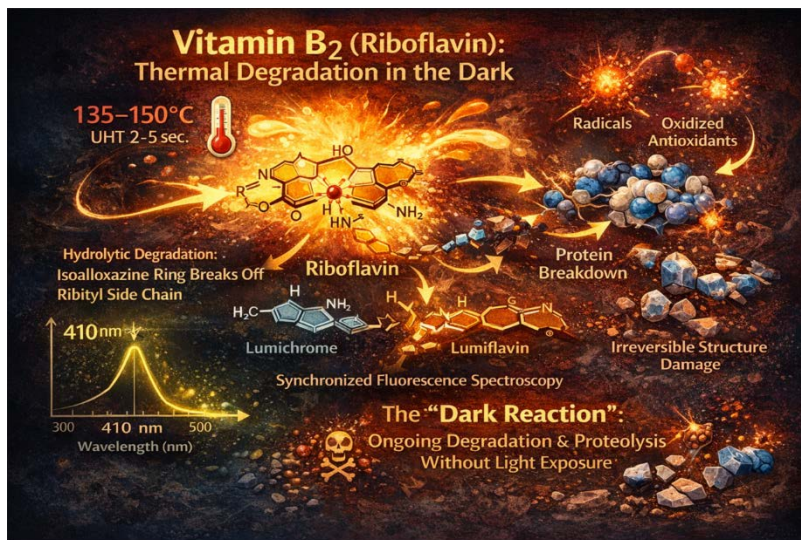


Figure 3. Vitamin B2 (Riboflavin): Thermal Degradation in the Dark

5. VITAMIN B12 (COBALAMIN): PROTEIN DENATURATION AND LOSS

During heat treatment, particularly at temperatures of 90°C and above, the unfolding of the β -lactoglobulin protein structure causes the cysteine residues, primarily Cys121, which are hidden in the hydrophobic core of the molecule, to become free. The Sulfhydryl (-SH) groups released during this process take on the task of scavenging reactive oxidants and, in the process, undergo oxidation-induced disulphide rearrangements (Li et al., 2022). LC-MS/MS-based proteomic analyses have shown that these sulphur-based residues not only trigger protein aggregation but also form covalent adducts with other reactive components in the environment (Yuan et al., 2023). Enzyme studies have also identified that cysteine residues modulate cobalamin (vitamin B12) reactivity and that the sulphur atom plays a crucial role in methyl group transfer (Esser et al., 2025;

Toohey, 2017). Therefore, free sulphydryl groups originating from denatured serum proteins create a redox-active microenvironment within the milk matrix that can directly affect the chemical stability of molecules such as vitamin B12.

When examining the degradation mechanism of vitamin B12, redox cycles catalysed by metal ions emerge as the determining factor rather than the presence of other vitamins in the environment. Ding et al. (2022), in their study on cyanocobalamin stability, determined that vitamin loss increased by up to 76% in the presence of redox-active metal ions such as Cu^{2+} and Fe^{2+} . This loss mechanism proceeds through a “redox cycle” initiated by metal ions and involving other oxidising agents in the environment (Ding et al., 2022). Redox-inactive metal ions, such as Zn^{2+} , consistently prevent B12 loss by suppressing this destructive cycle within the matrix (Ding et al., 2022). The combined presence of heat treatment and oxidative agents (such as H_2O_2) accelerates protein aggregation, creating an effect that leaves vitamin B12 unprotected and prone to oxidation (Krämer et al., 2017).

The chemical changes observed during the storage of UHT milk are shaped by ongoing oxidative modifications in the protein and lipid fractions rather than the initial vitamin levels. Methionine oxidation in casein proteins shows a marked increase during storage, indicating that the oxidative load of milk rises over time (Liu et al., 2019). High pasteurisation processes cause immediate and significant losses in vitamins B1, B2, and B12, while UHT and ESL processes initially exhibit more limited losses (Lalwani et al., 2024). However, during storage, the interaction between denatured whey proteins and casein micelles continues, and the resulting Maillard reaction products (glycosylated and lactosylated proteins) increase (Liu et al., 2019). The fate of vitamin B12 in this process is determined by the intensity of the heat treatment and the cumulative oxidative

stress developing in the matrix during storage (particularly methionine and cysteine oxidation), independent of the initial folate level in the milk.

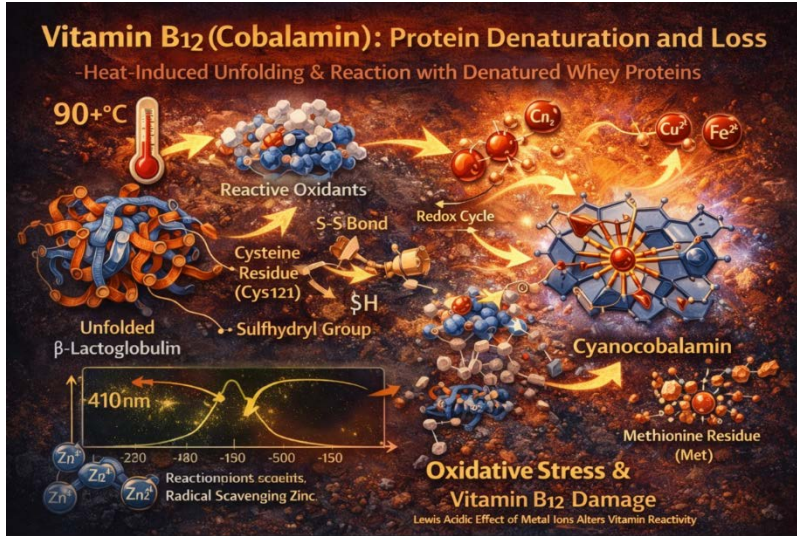


Figure 4. Vitamin B12 (Cobalamin): Protein Denaturation and Loss

6. LONG-TERM EFFECTS OF “THERMAL HISTORY” DURING STORAGE

The concept of “thermal history” describes the decisive effect of the thermal load to which milk is exposed during processing on the chemical and enzymatic reactions that continue during storage. Protein-protein interactions and enzymatic activities that begin during the UHT process but are not completed act as a mechanism that dictates chemical ageing throughout the shelf life of milk. In milk that has undergone direct UHT processing, the release of soluble proteins, free amino acids, calcium, and phosphorus from casein micelles into the serum phase increases during storage (Zhang et al., 2024). In this process, increased activity of proteolytic enzymes such as

plasmin and cathepsin triggers protein hydrolysis, which compromises the physical stability of milk and leads to the phenomenon of age-related gelation (Zhang et al., 2024). Although active protein retention is higher in ultra-instant UHT (UI-UHT) milk, these products become more prone to destabilisation during storage, and protein hydrolysis accelerates, particularly at temperatures of 25°C and above, causing sedimentation and gelation processes to gain momentum (Fan et al., 2024).

Chemical modifications occurring during storage are shaped by the initial thermal processing intensity and storage duration of the milk. Covalent and hydrophobic bonds formed between casein and serum proteins during heat treatment continue to evolve throughout storage, and oxidative modifications such as methionine oxidation are particularly prominent in UHT milk (Liu et al., 2019). The accumulation of advanced glycation end products (AGEs) and Maillard reaction products such as 3-deoxyglucosone and 3-deoxygalactosone reaches much higher levels in lactose-hydrolysed milk compared to conventional UHT milk (Zhang et al., 2019). There is a strong correlation between sediment formation and protein cross-linking; the molar ratios of advanced Maillard products such as N-ε-(carboxyethyl)lysine (CEL) and N-ε-(carboxymethyl)lysine (CML) in the sediment phase are measured to be higher than those of early-stage products (furosine) in the serum phase (Aguilera-Toro et al., 2022). These data provide evidence that the glycation chain initiated by thermal processing continues as a “dark reaction” during storage, causing proteins to lose solubility and precipitate.

When comparing the vitamin stability of pasteurised and UHT milk, although the shelf life of UHT milk being in the order of months increases the total vitamin loss numerically, pasteurised milk is considered to be in a more critical position in terms of the “vitamin loss per day” rate. However, the vitamin

B12 concentration in UHT-treated milk shows a much more pronounced time-dependent decline compared to vitamins B1 and B2 (Lalwani et al., 2024). As the intensity of the heat treatment increases and the storage period lengthens, vitamin degradation occurs at rates ranging from 1% to 22% (Lalwani et al., 2024). As pasteurised milk is typically stored in a cold chain (4°C), oxidative reactions slow down, but when UHT milk is stored at room temperature, the kinetics of chemical degradation accelerate. In this context, vitamin loss in UHT milk occurs not only due to the instantaneous effect of heat treatment but also due to the cumulative effect of oxidative stress experienced during long-term storage.

The effect of storage temperature on vitamin and component stability is directly related to the intensity of the heat treatment the milk undergoes during production (pasteurisation vs. UHT). In UHT milk stored at high temperatures such as 20°C, 30°C and 37°C, there are significant increases in fat aggregation, oxidation and lipolysis levels compared to milk stored at 4°C (Lu et al., 2019). Storage conditions reaching 40°C, in particular, accelerate the accumulation of Maillard reaction products and irreversibly alter the sensory profile of the milk (Zhang et al., 2019). While the requirement for low temperatures (4°C) in pasteurised milk acts as a protective shield for vitamins, the fact that UHT milk can be stored at ambient temperatures promotes chemical ageing by increasing molecular mobility. Therefore, the “thermal history” of milk encompasses not only the temperature-time profile at the time of processing but also the entire thermodynamic process the product undergoes until it reaches the consumer.

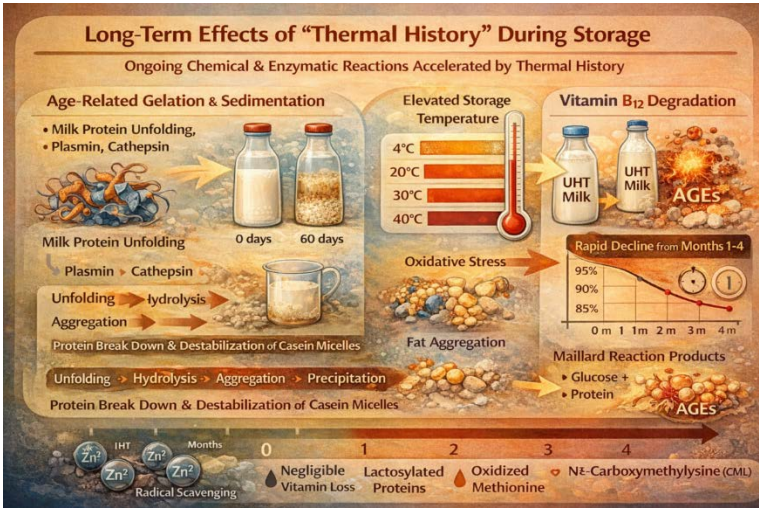


Figure 5. Long-Term Effects of “Thermal History” During Storage

7. KINETIC MODELLING AND MATHEMATICAL ANALYSIS

The thermal degradation of vitamins in food matrices follows a First-Order kinetic model, where the reaction rate is directly dependent on the reactant concentration at that moment. Kinetic modelling studies conducted on milk and enteral nutrition formulas have confirmed that the thermal degradation of vitamins B1, B2, and E proceeds according to this logarithmic decay law (Lalwani, Lewerentz, Löfgren, et al., 2024; Yang et al., 2024). The half-life ($t_{1/2}$) value calculated according to this mathematical model is inversely proportional to the reaction rate constant (k), and as the temperature increases, the rate constant increases exponentially, causing the half-life to decrease. At the 72°C temperature applied to pasteurised milk, the rate constant is quite low, ensuring that the half-life of molecules such as vitamin B2 (riboflavin) is much longer than the processing time (Shuang et al., 2024). In contrast, when the temperature reaches the 135-

150°C range in the UHT process, the rate constant increases dramatically and the half-life of the vitamin drops to the order of seconds (). However, the total duration of the UHT process (2-4 seconds) is so short that the process is terminated before the vitamin's half-life is reached, thus minimising the total loss.

Vitamin B12 (cobalamin) is more heat-sensitive than vitamin B2, as can be demonstrated mathematically by comparing the Activation Energy (E_a) parameters derived from the Arrhenius equation. The Arrhenius equation explains the effect of temperature changes on reaction rate through the linear relationship between $\ln(k)$ and $1/T$ (Youssef et al., 2023). The fact that the activation energy barrier required for the degradation reaction of vitamin B12 is lower than that of vitamin B2, or that the rate constant responds to temperature increases with a higher acceleration, proves the thermodynamic instability of the molecule. Studies on enteral formulas have determined that matrix properties such as the formula's fat content alter the activation energy and that systems with high activation energy are more sensitive to temperature changes (Yang et al., 2024). Vitamin B12, due to its complex corrin ring and sensitivity to metal ions, exhibits a steeper slope on the Arrhenius graph, causing even small temperature increases to exponentially increase the rate of degradation.

The balance between food safety and nutritional quality is based on the large difference between the D-values (Decimal Reduction Time) of vitamins and bacteria. The D-value represents the time required to reduce the concentration or population of the target substance by 90% (a logarithmic decrease) at a specific constant temperature. The D-values calculated for the thermal degradation of vitamins are generally much higher than the D-values required for the inactivation of pathogenic bacteria and spores. For example, while bacterial spores are inactivated within seconds at 140°C, it takes minutes or hours for vitamins to

degrade by 90%. This kinetic difference creates a safe processing window known as the “quality margin”. Advanced thermal technologies such as ohmic heating further widen this kinetic difference, slowing the degradation kinetics of bioactive components and providing higher nutrient retention compared to conventional methods (Salari & Jafari, 2020).

8. CONCLUSION

Low-temperature pasteurisation standards preserve the chemical integrity of the Riboflavin molecule to a high degree, whereas the thermal thresholds exceeded in UHT processing permanently alter the physicochemical balance of milk. Protein denaturation and the release of sulphur compounds, which begin when the temperature exceeds 90°C, transform the microenvironment where vitamins are located into an oxidising environment. Despite its rigid molecular structure, vitamin B12 cannot resist the reactions catalysed by the released Sulfhydryl groups and metal ions. These structural transformations occurring during thermal processing demonstrate that vitamin loss is not limited to that moment but rather marks the beginning of a chain of chemical degradation that extends throughout the storage process.

The storage process acts as a biochemical reflection of the “thermal history” experienced on the production line. Even in environments completely isolated from light, Riboflavin and Cobalamin molecules are attacked by free radicals triggered during processing and by Maillard reaction products. Although vitamin B2 exhibits relative resistance to thermal shocks, vitamin B12 succumbs to oxidative stress within the matrix as the storage period lengthens, rapidly losing its concentration. These “dark reactions”, progressing in parallel with the proteolysis and gelation processes that continue throughout the shelf life of milk,

demonstrate that the decline in nutritional value is an inevitable thermodynamic outcome.

The kinetic data obtained confirm that vitamin degradation is not random but occurs in a predictable mathematical plane consistent with the First-Order kinetic model and the Arrhenius equation. The low activation energy barrier of vitamin B12 increases the intensity of its response to temperature changes and leaves this molecule vulnerable to the residual shocks created by thermal processing. Although the difference in D-values between bacterial inactivation and vitamin destruction provides the necessary margin for food safety, this range is not always sufficient to preserve bioavailability. In the design of industrial processes, not only the goal of eliminating the instantaneous microbial load but also the optimisation of the thermal load that shortens the half-lives of vitamins should be a decisive criterion.

Thermal processing strategies in the dairy industry extend the shelf life of products while leaving irreversible traces in the molecular memory of the nutrient matrix. The preservation of vitamins is not possible through the control of temperature parameters alone, but rather through the comprehensive management of changes occurring in the protein-fat phase of milk and storage conditions. The different physical instabilities created by indirect and direct heating methods alter the mechanism of vitamin loss, meaning that the choice of production technology directly determines nutritional quality. Future projections indicate that the integration of non-thermal technologies or hybrid methods that minimise thermal load are becoming an essential direction for preserving the natural nutritional profile of milk.

REFERENCES

- Aguilera-Toro, M., Poulsen, N. A., Akkerman, M., Rauh, V., Larsen, L. B., & Nielsen, S. D.-H. (2022). Development in Maillard reaction and dehydroalanine pathway markers during storage of UHT milk representing differences in casein micelle size and sedimentation. *Foods*, 11(10), 1525. <https://doi.org/10.3390/foods11101525>
- Ali, H., Saleem, M., Ullah, R., Khan, S., Atta, B. M., & Bilal, M. (2019). Thermal effects on biochemical signatures of UHT, pasteurized and domestically boiled buffalo milk detected by synchronous fluorescence spectroscopy. *Journal of Fluorescence*, 29(2), 485–493.
- Auclair, O., Han, Y., & Burgos, S. A. (2019). Consumption of milk and alternatives and their contribution to nutrient intakes among Canadian adults: Evidence from the 2015 Canadian Community Health Survey—Nutrition. *Nutrients*, 11(8), 1948. <https://doi.org/10.3390/nu11081948>
- Bai, G., Cheng, L., Peng, L., Wu, B., Zhen, Y., Qin, G., Zhang, X., Aschalew, N. D., Sun, Z., & Wang, T. (2023). Effects of ultra-high-temperature processes on metabolite changes in milk. *Food Science and Nutrition*, 11, 3601–3615.
- Chen, J., Zhang, J., Wang, N., Sun, X., Han, X., Yin, R., Pei, X., Liu, C., Pang, X., Huang, F., & Chen, A. (2024). Comparative study on microbiological, physicochemical and nutritional properties of whole cow milk by thermal and non-thermal processing technologies. *Food Bioscience*, 59(10), 104012. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104012>

- Cifelli, C. J., Agarwal, S., & Fulgoni, V. L. III. (2022). Association between intake of total dairy and individual dairy foods and markers of folate, vitamin B6 and vitamin B12 status in the U.S. population. *Nutrients*, 14(12), 2441. <https://doi.org/10.3390/nu14122441>
- Condict, L., Paramita, V. D., & Kasapis, S. (2019). Dairy protein–ligand interactions upon thermal processing and targeted delivery for the design of functional foods. *Current Opinion in Food Science*, 27, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.03.007>
- Deeth, H. C. (2017). Optimum thermal processing for extended shelf-life (ESL) milk. *Foods*, 6(11), 102.
- Ding, H., Han, Z., Wang, B., Wang, Y., Ran, Y., Zhang, L., Li, Y., Lu, C., Lu, X., & Ma, L. (2023). Effect of direct steam injection and instantaneous ultra-high-temperature (DSI-IUHT) sterilization on the physicochemical quality and volatile flavor components of milk. *Molecules*, 28(8), 3543. <https://doi.org/10.3390/molecules28083543>
- Ding, Y., Choy, L. Y., Chew, M. H., Lin, Q., & Johns, P. W. (2022). Effects of metal ions on cyanocobalamin stability in heated milk protein-based matrices. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 7349–7358. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16089>
- Esser, A. J., Sastre, S., Dinh, T. J., Tanner, V., Wingert, V., Klotz, K., Jacobsen, D. W., Spiekerkoetter, U., Schilling, O., Zeida, A., Radi, R., & Hannibal, L. (2025). A noncatalytic cysteine residue modulates cobalamin reactivity in the human B12 processing enzyme CblC. *Biochemistry*, 64(3), 692–709. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.4c00613>

- Fan, K., Wu, P., Guo, M., Wang, Y., Cao, Y., Wang, P., Ren, F., & Luo, J. (2024). Destabilization of ultra-instantaneous ultra-high-temperature sterilized milk stored at different temperatures. *Journal of Dairy Science*, 107(8), 5460–5472. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24705>
- Gharibzahedi, S. M. T., Moghadam, M., Amft, J., Tolun, A., Hasabnis, G., & Altintas, Z. (2023). Recent advances in dietary sources, health benefits, emerging encapsulation methods, food fortification, and new sensor-based monitoring of vitamin B12: A critical review. *Molecules*, 28(22), 7469. <https://doi.org/10.3390/molecules28227469>
- Górska-Warsewicz, H., Rejman, K., Laskowski, W., & Czacotko, M. (2019). Milk and dairy products and their nutritional contribution to the average Polish diet. *Nutrients*, 11(8), 1771. <https://doi.org/10.3390/nu11081771>
- Hess, J. M., Cifelli, C. J., & Fulgoni, V. L. (2020). Energy and nutrient intake of Americans according to meeting current dairy recommendations. *Nutrients*, 12(10), 3006.
- Krämer, A. C., Torreggiani, A., & Davies, M. J. (2017). Effect of oxidation and protein unfolding on cross-linking of β -lactoglobulin and α -lactalbumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(47), 10258–10269. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03839>
- Lalwani, S., Lewerentz, F., Håkansson, A., Babic, M., Madina, P., Edén, J., Paulsson, M., & Glantz, M. (2024). A pilot scale study on the effects of various temperature and time conditions on milk quality using direct and indirect heating systems. *International Dairy Journal*, 155, 105951.

- Lalwani, S., Lewerentz, F., Håkansson, A., Löfgren, R., Eriksson, J., Paulsson, M., & Glantz, M. (2024). Changes in nutritional and technological properties of heat-treated milk and cream at dairy production scale during storage. *International Dairy Journal*, 154, 105927. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.105927>
- Lalwani, S., Lewerentz, F., Håkansson, A., Löfgren, R., Eriksson, J., Paulsson, M., & Glantz, M. (2024). Impact of thermal processing on micronutrients and physical stability of milk and cream at dairy production scale. *International Dairy Journal*, 153(5), 105901.
- Lalwani, S., Lewerentz, F., Löfgren, R., Paulsson, M., Glantz, M., & Håkansson, A. (2024). Exploring predictive kinetic modelling of thermal degradation from laboratory to production scale: A case study on three vitamins in milk. *Food and Bioprocesses*, 146, 69–76.
- Li, C., Nielsen, S. B., Engholm-Keller, K., & Lund, M. N. (2022). Oxidation of whey proteins during thermal treatment characterized by a site-specific LC-MS/MS-based proteomic approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(14), 4391–4406. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07946>
- Liu, H., Grosvenor, A. J., Li, X., Wang, X.-L., Ma, Y., Clerens, S., Dyer, J. M., & Day, L. (2019). Changes in milk protein interactions and associated molecular modification resulting from thermal treatments and storage. *Journal of Food Science*, 84(7), 1737–1745.
- Lu, J., Langton, M., Sampels, S., & Pickova, J. (2019). Lipolysis and oxidation in ultra-high temperature milk depend on sampling month, storage duration, and temperature. *Journal of Food Science*, 84(5), 1045–1053.

- Moravcová, M., Siatka, T., & Krčmová, L. K. (2025). Biological properties of vitamin B12. *Nutrition Research Reviews*, 38(1), 338–370.
- Pegu, K., & Arya, S. S. (2023). Non-thermal processing of milk: Principles, mechanisms and effect on milk components. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(4), 100730.
- Polak, N., Kalisz, S., Hać-Szymańczuk, E., & Kruszewski, B. (2024). Impact of conventional pasteurization, high temperature short time, ultra-high temperature, and storage time on physicochemical characteristics, bioactive compounds, antioxidant activity, and microbiological quality of fruit nectars. *Foods*, 13(23), 3963. <https://doi.org/10.3390/foods13233963>
- Poljšak, B., Kovač, V., & Milisav, I. (2021). Antioxidants, food processing and health. *Antioxidants*, 10(3), 433. <https://doi.org/10.3390/antiox10030433>
- Ruetz, M., Shanmuganathan, A., Gherasim, C., Karasik, A., Salchner, R., Kieninger, C., Wurst, K., Banerjee, R., Koutmos, M., & Kräutler, B. (2017). Inhibierung des humanen B12-verarbeitenden Enzyms CblC durch Antivitamine B12 – Kristallstruktur des inaktiven ternären Komplexes mit dem Kosubstrat Glutathion. *Angewandte Chemie*, 129(25), 7493–7498.
- Salari, S., & Jafari, S. M. (2020). The influence of ohmic heating on degradation of food bioactive ingredients. *Food Engineering Reviews*, 12(2), 191–208. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09217-0>
- Sharabi, S., Okun, Z., & Shpigelman, A. (2018). Changes in the shelf life stability of riboflavin, vitamin C and antioxidant properties of milk after (ultra) high pressure

- homogenization: Direct and indirect effects. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47(4), 161–169.
- Shuang, J., Liu, Y., Hettinga, K., Zhang, L., Liu, X., & Zhou, P. (2025). Effects of different heat treatments on the bioactive components, bactericidal and antioxidative capacity of bovine milk. *International Journal of Dairy Technology*, 78(1), e13154. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.13154>
- Temova Rakuša, Ž., Roškar, R., Hickey, N., & Geremia, S. (2023). Vitamin B12 in foods, food supplements, and medicines: A review of its role and properties with a focus on its stability. *Molecules*, 28(1), 240. <https://doi.org/10.3390/molecules28010240>
- Toohy, J. I. (2017). Possible involvement of hydrosulfide in B12-dependent methyl group transfer. *Molecules*, 22(4), 582. <https://doi.org/10.3390/molecules22040582>
- Ulmann, N., Kunz, W., Hioe, J., Touraud, D., & Horinek, D. (2024). Self-association as solubility limiting factor of riboflavin in aqueous medium. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 26(27).
- Vincenti, A., Bertuzzo, L., Limitone, A., D'Antona, G., & Cena, H. (2021). Perspective: Practical approach to preventing subclinical B12 deficiency in elderly population. *Nutrients*, 13(6), 1913.
- Wang, Y., Xiao, R., Liu, S., Wang, P., Zhu, Y., Niu, T., & Chen, H. (2024). The impact of thermal treatment intensity on proteins, fatty acids, macro/micro-nutrients, flavor, and heating markers of milk: A comprehensive review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(16), 8670. <https://doi.org/10.3390/ijms25168670>

- Woźniak, D., Cichy, W., Dobrzyńska, M. M., Przysławski, J., & Drzymała-Czyż, S. (2022). Reasonableness of enriching cow's milk with vitamins and minerals. *Foods*, 11(8), 1079. <https://doi.org/10.3390/foods11081079>
- Yang, H., Hou, L., Sun, H., & Ye, S. (2024). Degradation kinetics of vitamins in different enteral feeding formulas during storage at different temperatures. *Heliyon*, 10(8), e29653.
- Youssef, A. A., Salas, A. H., Al-Harbi, N. Y., Basfer, N. M., & Nassr, D. I. (2023). Determination of chemical kinetic parameters in Arrhenius equation of constant heating rate: Theoretical method. *Alexandria Engineering Journal*, 67(3), 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.046>
- Yuan, J., Anantharamkrishnan, V., Hoyer, T. R., & Reineccius, G. A. (2023). Covalent adduct formation between β -lactoglobulin and flavor compounds under thermal treatments that mimic food pasteurization or sterilization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(24), 9481–9489. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c01220>
- Zhang, T., Liu, Y., Cao, J., Jiang, L., Lin, K., Wang, P., Ren, F., & Yi, H. (2024). Milk serum peptidomics revealed the age gelation of direct UHT milk. *Food Chemistry*, 456, 140012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140012>
- Zhang, W., Poojary, M. M., Rauh, V., Møller, P., Ipsen, R., Larsen, M. K., Løkkegaard, B., Skibsted, L. H., Sørensen, J. C., & Lund, M. N. (2019). Quantitation of α -dicarbonyls and advanced glycation endproducts in conventional and lactose-hydrolyzed ultrahigh temperature milk during 1 year of storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(46), 12863–12874.

EVCİL HAYVAN MAMASI GÜVENLİĞİNDE RİSK PROFİLİ: RASFF VERİLERİNE DAYALI BİR DEĞERLENDİRME (2020–2025)

Senem TÜFEKÇİ¹

1. GİRİŞ

Gıda güvenliği, tüm insan ve hayvanların her zaman, aktif ve sağlıklı bir yaşam için beslenme ihtiyaçlarını ve gıda tercihlerini karşılayan yeterli, güvenli ve besleyici gıdaya fiziksel, sosyal ve ekonomik erişime sahip olması olarak tanımlanır (Clapp vd., 2022). Evcil hayvan maması güvenliği, yalnızca mamayla taşınabilen enfeksiyon etkenlerinin hayvan sağlığı üzerindeki potansiyel olumsuz etkileriyle değil, aynı zamanda insan ve hayvanların paylaştığı ortak yaşam alanının getirdiği kritik halk sağlığı riskleriyle de doğrudan ilişkilidir. (Leiva vd., 2019). Evcil hayvanların gıda kaynaklı patojenlere nispeten dirençli olmalarına karşın, özellikle mikotoksinler ve veteriner ilaç kalıntılarına karşı yüksek duyarlılık gösterdikleri bilinmektedir. Bu duyarlılık, yem tedariki ve üretim süreçlerindeki tehlikelerin çeşitliliği ile birleştiğinde ciddi bir risk tablosu ortaya çıkarmaktadır. Söz konusu tehlikeler; bitkisel bileşenlerdeki (tahıl, baklagil vb.) mikotoksinler ve topraktan geçen ağır metaller ile hayvansal kaynaklardaki antibiyotik kalıntıları gibi kimyasal kirleticileri; et kaynaklı *Salmonella* gibi biyolojik patojenleri ve üretim hattından karışabilecek metal veya plastik gibi fiziksel kontaminantları kapsamaktadır. Tarihsel süreçte yaşanan aflatoksin zehirlenmeleri, veteriner ilaç kontaminasyonları ve taşıyıcı kaynaklı krizler; gıda güvenliği

¹ Öğretim Görevlisi Dr., Pamukkale Üniversitesi, Acıpayam Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0002-4613-2418.

yönetiminin yalnızca üretim sürecini değil, aynı zamanda ürün tasarımı ve formülasyonunu da kapsayan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. (DeBeer vd., 2024; Carrión, 2023; Zicker 2008).

Geçmişte yaşanan gıda krizleri, canlı hayvanları veya yem üretim süreçlerini kapsamayan eski uyarı mekanizmalarının sınırlılıklarını ve yetersizliğini net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu tecrübeler ışığında, gıda güvenliği yönetimi 'çiftlikten sofraya' politikası doğrultusunda yeniden yapılandırılmıştır. Bu dönüşümün bir sonucu olarak Gıda ve Yem için Hızlı Uyarı Sistemi (RASFF); kapsamı genişletilerek, evcil hayvan yemi bileşenleri de dahil olmak üzere gıda ve yem güvenliğine ilişkin her türlü risk bilgisinin paylaşıldığı, iyileştirilmiş ve bütünlük bir uyarı ağı haline getirilmiştir (Bánáti, 2010). Bu çerçevede, 2020–2025 kesitindeki RASFF verilerinin bildirim türü, risk kararı ve tehlike sınıfları açısından sistematik bir biçimde irdelenmesi; evcil hayvan maması güvenliği risk profilini netleştirecek ve tedarik–formülasyon–üretim eksenindeki önleyici stratejilerin belirlenmesi adına kritik bir zemin oluşturacaktır.

2. GIDA VE YEM İÇİN HIZLI ALARM SİSTEMİ (RASFF)

Gıda güvenliğine ilişkin endişelerin ele alınmasından sorumlu bağımsız bir kuruluş olan Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), malların serbest dolaşımı ile halk sağlığının korunmasını hedefleyen ve gıda güvenliğinin temelini oluşturan (EC) No. 178/2002 sayılı Tüzük çerçevesinde faaliyet göstermektedir. Bu tüzük, yaklaşan tehlikelerin raporlanmasını sağlayacak bir Gıda ve Yem için Hızlı Alarm Sistemi'nin (RASFF) uygulanmasını öngörmektedir (Prata, 2024; Piglowski, 2020).

Gıda ve Yem için Hızlı Alarm Sistemi (RASFF), 1979 yılında kurulmuş olup Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen; Avrupa Birliği (AB) üye ülkeleri için gıda güvenliğine ilişkin bilgilerin derlenmesini sağlayan merkezi bir izleme ve bildirim aracıdır (Dada vd., 2021). Bir gıda radarı olarak tanımlayabileceğimiz bu sistemin üyeleri; Avrupa Birliği (AB) ülkeleri, Avrupa Komisyonu, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), Avrupa Serbest Ticaret Birliği Gözetim Otoritesi (ESA) ve Norveç, Lihtenştayn, İzlanda ve İsviçre'dir (Pigłowski 2025; Pigłowski 2023). Hızlı Alarm Sistemi'ne üye ülkeler, insan ve hayvan sağlığını tehdit edebilecek herhangi bir risk tespit edildiğinde Komisyon'a bildirim iletmektedir (Çınar vd., 2017). Böylece RASFF aracılığıyla komisyonu; gıda ve yemin piyasaya arzının sınırlandırılması, piyasadan geri çekilmesi veya geri çağırılmasının zorunlu kılınmasına yönelik tüm tedbirler ile gıda ve yemin kullanımının önlenmesi ya da kontrol altına alınmasına ilişkin işletmecileri (operatörleri) kapsayan her türlü uygulama hakkında bilgilendirir. Ayrıca, AB sınır kapılarında yetkili otoritelerce reddedilen her gıda ve yem partisinin detayları da komisyona bildirilir. Komisyon, iletilen bu bilgileri ağ genelinde paylaşır; ilgili diğer üyeler gerekli görülen durumlarda doğrulama yapar ve ürünün kendi piyasalarında bulunması hâlinde izleme faaliyetlerini yürütür. Süreç sonunda alınan önlemler Komisyona geri bildirilir; gıda güvenliği açısından RASFF'te tanımlanan risklere ilişkin bilgiler, uygun görülen ölçüde kamuoyu ile de paylaşılır (Mikulec, Zborowski, & Kowalski, 2023; Kowalska ve Manning, 2021; Parisi, 2016).

RASFF bildirimleri uyarı, bilgilendirme, sınır reddi ve haber olmak üzere dört kategoriye ayrılmıştır (Papapanagiotou, 2021). Sınır reddi bildirimleri, AB/AEA'nın dış sınırlarında kontrol edilen ve sınırda reddedilen ürünlere ilişkindir; uyarı ve bilgilendirme ise AB/AEA içindeki ürünlerle ilgilidir. Uyarı ve bilgilendirme bildirimleri arasındaki temel fark, bildirimin

yayımlanmasının ardından gereken müdahalenin hızı ve niteliğidir. Uyarı bildirimleri diğer RASFF üye ülkelerinde hızlı eylem gerektirirken, bilgilendirme bildirimlerinde bu zorunluluk yoktur. 2011’de yürürlüğe giren (EC) 16/2011 düzenlemesiyle bilgilendirme bildirimleri iki alt türe ayrılmıştır: “takip için bilgilendirme” ve “dikkat için bilgilendirme”. “Takip için bilgilendirme”, ürünün başka bir ülkede de piyasada olabileceği durumları kapsar; uyarıya benzer olsa da hızlı aksiyon şartı aranmaz. “Dikkat için bilgilendirme” ise ürünün yalnızca bildirimi yapan ülkede bulunması, artık piyasada olmaması ya da hiç piyasaya sunulmamış olması gibi durumlarda yayımlanır (Lüth vd., 2019).

3. METODOLOJİ

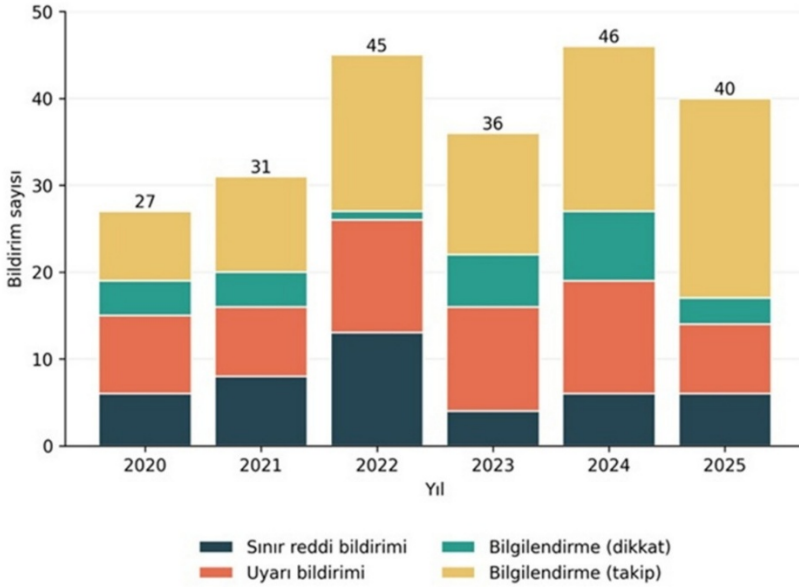
Bu araştırmanın veri seti, Avrupa Komisyonu’nun RASFF Portalı (<https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/search>) üzerinden erişime açık olarak sunulan ve evcil hayvan maması (pet food) kategorisinde sınıflandırılan bildirimlerden oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında 01.01.2020–20.12.2025 tarihleri arasındaki yaklaşık altı yıllık dönemde kaydedilen toplam 225 bildirim incelenmiştir.

Verilerin analize uygun hale getirilmesi amacıyla ham veri setine kapsamlı bir veri temizleme ve standardizasyon süreci uygulanmıştır. Bu süreçte mükerrer kayıtlar ayıklanarak veri seti tekilleştirilmiştir. Elde edilen veriler, frekans ve yüzde dağılımları ile değerlendirilmiştir. Bildirimlerin yıllar içindeki eğilimi ve dönemsel yoğunlaşmaları zaman serisi yaklaşımı ile incelenmiş; değişkenler arasındaki ilişkiler çapraz tablolar ve ısı haritaları aracılığıyla görselleştirilmiştir. Tüm veri işleme adımları Microsoft Excel yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. RASFF VERİTABANI ANALİZİ

Bu bölümde, RASFF veri tabanından elde edilen bildirim kayıtları çalışma kapsamı ve değişkenleri doğrultusunda sistematik olarak analiz edilerek bulgular, ilgili şekil ve tablolar eşliğinde sunulmuştur.

RASFF veri tabanında evcil hayvan maması kategorisinde yer alan bildirimlerin 2020–2025 dönemindeki yıllık değişimi ve bildirim türlerine göre (sınır reddi bildirimi, uyarı bildirimi, bilgilendirme-dikkat) ve bilgilendirme-takip) yapısal dağılımı Şekil 1’de sunulmuştur.



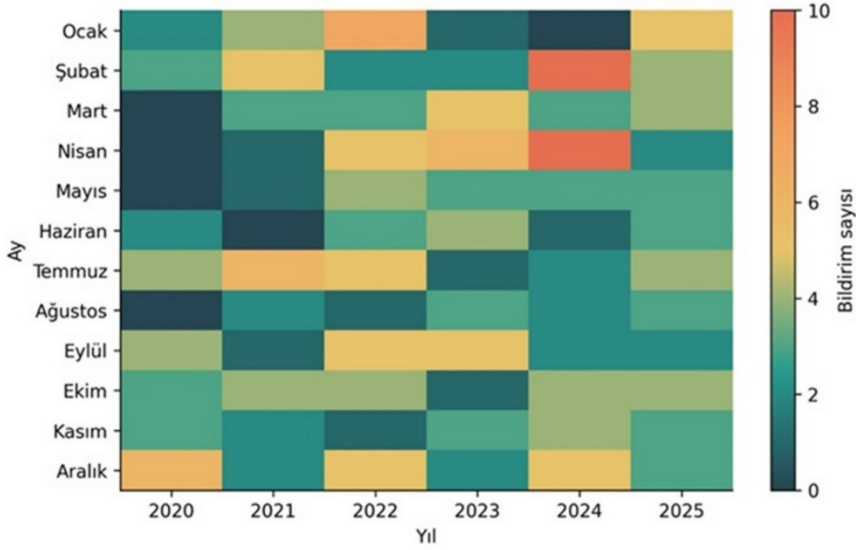
Şekil 1. Evcil Hayvan Maması Bildirimlerinde Yıllara Göre Değişimi ve Bildirim Türlerine Göre Yapısal Karakterizasyon.

İncelenen dönemde toplam bildirim sayısı dalgalı bir seyir izlemiştir. 2020 yılında 27 olan bildirim sayısı, takip eden yıllarda artış eğilimine girerek 2022’de 45 seviyesine ulaşmıştır. 2023 yılında 36’ya gerileyen bildirimler, 2024 yılında dönem içi en yüksek değer olan 46’ya yükselmiş; 2025 yılında ise 40 bildirim

ile yüksek seyrini korumuştur. Bu veriler, bildirim yükünün belirli bir yılla sınırlı kalmayıp dönem genelinde değişkenlik gösteren, süregelen bir nitelik taşıdığını ortaya koymaktadır.

Bildirimin türü açısından dönem toplamında bilgilendirme-takip kategorisindeki bildirimler 93 kayıt ve %41,33 oran ile en yüksek paya sahiptir. Bunu uyarı bildirimleri 63 kayıt ve sınır reddi bildirimleri 43 kayıt ile izlemektedir. Bilgilendirme-dikkat kategorisindeki bildirimler ise 26 kayıt ile daha sınırlı bir sayıda olduğu tespit edilmiştir. Yıllar bazında, 2022’de uyarı ve sınır reddi bildirimlerinin birlikte yükselmesi, 2024’te bilgilendirme-dikkat bildirimlerinin artması ve 2025’te bilgilendirme-takip bildirimlerinin 23 kayıt ile yıllık bildirimlerin toplamının %57,5’ini oluşturması dikkat çekmektedir.

Şekil 2, 2020–2025 döneminde evcil hayvan mamasına ilişkin RASFF bildirimlerinin ay–yıl düzleminde nasıl kümелendiğini göstermektedir. Isı haritası, bildirimlerin yıl içine homojen dağılmadığını, belirli dönemlerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. En belirgin yoğunlaşma 2024 yılında Şubat ve Nisan aylarında görülmüştür. Diğer yıllarda ise tepe noktaları daha sınırlı düzeydedir. Buna karşılık bazı yıl–ay kombinasyonlarında bildirimin hiç görülmemesi, ilgili dönemde riskin bulunmadığından ziyade, ticaret hacmi ve resmi kontrol/örnekleme yoğunluğu gibi bağlamsal etkenlerin de bildirim sayılarını şekillendirebildiğini göstermektedir. Bu zamansal desen, mevsimsellik olasılığına işaret etse de RASFF bildirimleri olay tespiti ve raporlama temellidir; dolayısıyla gerçek kontaminasyon sıklığını doğrudan temsil etmemektedir.

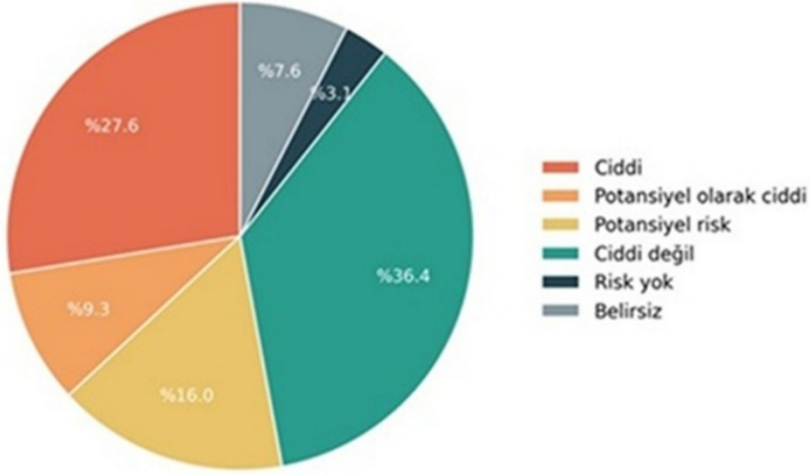


Şekil 2. Evcil Hayvan Maması Bildirimlerinin Ay-Yıl Matrisinde Zamansal Karakterizasyonu.

Evcil hayvan maması bildirimlerinde risk kararı en yüksek pay “ciddi değil” kategorisindedir (%36,4; n=82). Bunu “ciddi” kararları izlemekte (%27,6; n=62) ve bu bulgu, bildirimlerin kayda değer bir bölümünün mevzuat uyumsuzluğu olmanın ötesinde yüksek önem düzeyinde değerlendirildiğini göstermektedir. “Potansiyel risk” kararları %16,0 (n=36), “potansiyel olarak ciddi” kararları ise %9,3 (n=21) oranlarıyla; belirsizlik veya ek kanıt gereksinimi bulunan ancak tedbir yaklaşımını gerektirebilecek bir bildirim kümesinin varlığına işaret etmektedir.

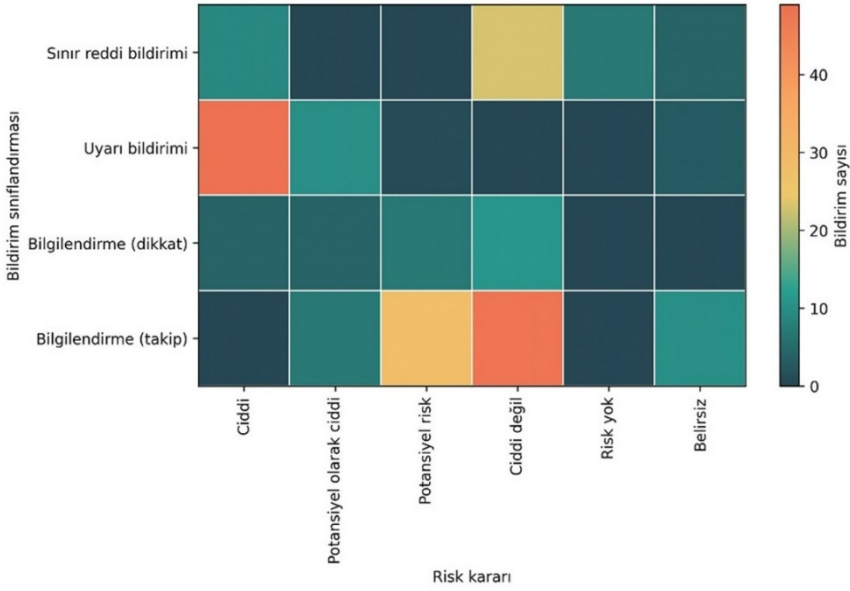
Diğer yandan “belirsiz” risk kararlarının %7,6 (n=17) düzeyinde olması, bazı bildirimlerde risk değerlendirmesi için gerekli veri ve izlenebilirliğin sınırlı kaldığını göstermiştir. “Risk yok” kategorisinin %3,1 (n=7) ile düşük düzeyde seyretmiştir. Gıda güvenliği perspektifinden bakıldığında; ciddi ve potansiyel olarak ciddi risk kararlarının toplam içindeki yüksek payı, evcil hayvan maması zincirindeki denetimlerin önemini ortaya

koymaktadır. Mevcut tablo, riskin sadece hayvan sağlığıyla sınırlı kalmayıp, zoonotik etkenler ve çapraz kontaminasyon potansiyeli nedeniyle halk sağlığı açısından da etkin bir izleme ve risk iletişimi stratejisini zorunlu kıldığını göstermektedir.



Şekil 3. Evcil Hayvan Maması Bildirimlerinin Risk Kararı Dağılımı.

Evcil hayvan maması kategorisine ait RASFF bildirim sınıflandırmaları ile risk kararları arasındaki ilişki çapraz dağılım üzerinden incelenmiştir (Şekil 4). Analiz sonuçları, bildirim türü ile risk kararı arasında belirgin bir eşleşme olduğunu ortaya koymaktadır. Uyarı bildirimlerinde kararların büyük çoğunluğunun ciddi (49/63) ve potansiyel olarak ciddi (10/63) düzeyinde yoğunlaşması, bu kategorinin öncelikli olarak yüksek risk taşıyan acil durumlar için kullanıldığını teyit etmektedir.



Şekil 4. Evcil Hayvan Maması Bildirimlerinin Sınıflandırması ve Risk Kararı Arasındaki İlişkinin Çapraz Dağılımı.

Buna karşılık sınır reddi bildirimleri, ağırlıklı olarak ciddi değil (23/43) kararından oluşmaktadır. Risk yok kararının (7/43) yalnızca bu grupta görülmesi, ancak ciddi risklerin de (9/43) tamamen dışlanmaması; sınır reddi mekanizmasının hem teknik mevzuat uyumsuzluklarını hem de kritik riskleri kapsayan ikili bir nitelik taşıdığına işaret etmektedir. Söz konusu retlerin patojen veya kimyasal kontaminasyon gibi doğrudan sağlık risklerinden ziyade, büyük ölçüde belge eksikliği, hatalı etiketleme veya mevzuat uyumsuzlukları gibi idari gerekçelere dayandığına işaret etmektedir.

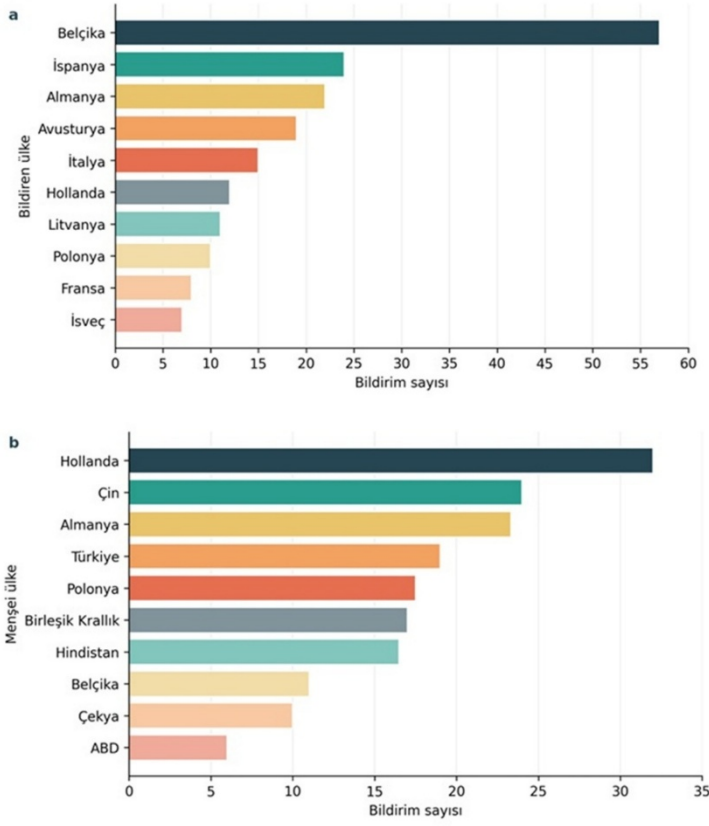
Bilgilendirme-takip kategorisi ise ciddi değil (48/93) ve potansiyel risk (28/93) kararlarında kümelenmiştir; bu grupta ciddi risk kararının bulunmayışı, söz konusu bildirimlerin acil müdahaleden ziyade süreç izleme ve kontrol gerektiren durumlarla ilişkilendirildiğini göstermektedir. Daha heterojen bir yapı sergileyen bilgilendirme-dikkat grubunda ise risk düzeyi

geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Sonuç olarak RASFF sınıflandırmasının sadece riskin şiddetini değil, aynı zamanda olayın yönetim biçimini (acil uyarı, sınırda durdurma, izleme) de yansıttığını; özellikle uyarı–ciddi ve takip–düşük risk ekseninde sistemin tutarlı bir ayrışma sergilediğini kanıtlamaktadır.

2020–2025 döneminde evcil hayvan maması bildirimlerinin coğrafi örüntüsünü; en sık bildirim yapan ülkeler ve en sık tespit edilen menşei ülkeler olmak üzere iki düzlemde incelenmiştir (Şekil 5).

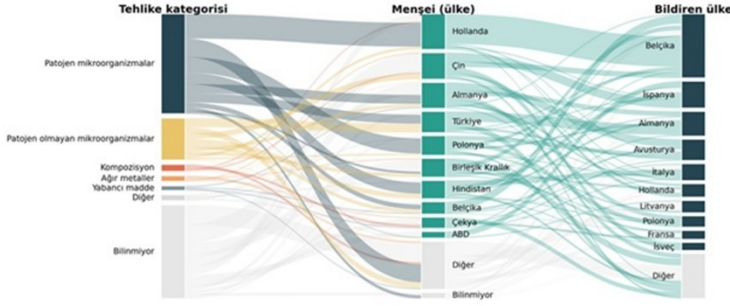
Şekil 5a’da sunulan bildirim yapan ülkeler içinde Belçika’nın 57 bildirim ve %25,3’lük oran ile ilk sırada yer aldığı, bu ülkeyi İspanya (24; %10,7), Almanya (22; %9,8) ve Avusturya’nın (19; %8,4) takip ettiği görülmektedir. İlk dört ülkenin toplam bildirimlerin %54,2’sini oluşturduğu bu tabloda; İtalya, Hollanda, Litvanya ve Polonya’nın da eklenmesiyle ilk sekiz ülkenin kümülatif payı %75,6’ya ulaşmaktadır. Söz konusu coğrafi yoğunlaşma; yalnızca tehlike sıklığının bir göstergesi olarak değil, aynı zamanda ilgili ülkelerdeki resmi kontrol yoğunluğu, gümrük denetim stratejileri ve ticaret akış hacmi gibi tespit ve raporlama dinamiklerinin bir yansıması olarak değerlendirilmektedir.

Menşei ülke dağılımı bildirimlerin küresel tedarik zincirindeki belirli merkezlerde yoğunlaştığını göstermektedir. Hollanda, 32 bildirim ve %14,2’lik pay ile listenin başında yer alırken; onu Çin (24; %10,7) ve Almanya (23; %10,2) takip etmektedir. Türkiye (19; %8,4) ve Polonya’nın (17; %7,6) da eklenmesiyle, ilk beş ülkenin toplam bildirimlerin yarısından fazlasını oluşturduğu görülmektedir. Listenin devamında Birleşik Krallık, Hindistan, Belçika, Çek Cumhuriyeti ve ABD’nin yer almasıyla, ilk 10 menşei ülkenin kümülatif payı %77,3’e ulaşmaktadır.



**Şekil 5. Evcil Hayvan Maması Bildirimlerinde Coğrafi Dağılım:
(a) En Sık Bildirim Yapan Ülkeler ve (b) En Sık Tespit Edilen
Menşei Ülkeler.**

Şekil 6, 2020–2025 döneminde evcil hayvan maması bildirimlerinin “tehlike kategorisi-menşei ülke-bildiren ülke” ekseninde nasıl bir akış izlediğini Sankey diyagramı ile göstermektedir.



Şekil 6. Evcil Hayvan Maması Bildirimlerinde Tehlike Kategorisi, Menşei ve Bildiren Ülke Arasındaki Çok Boyutlu Akış Dinamiği.

Diyaqramın sol tarafında akışın ağırlıklı olarak mikrobiyolojik tehlikelerde (özellikle *patojen mikroorganizmalar* ve *patojen olmayan mikroorganizmalar*) kategorisinde toplandığı görülmektedir. Bu durum, hayvan yemi zincirinde denetim odağının büyük ölçüde mikrobiyolojik riskler etrafında şekillendiğini göstermektedir.

Tablo 1, 2020–2025 döneminde kayıtlarında evcil hayvan maması ve ilgili ürünlerde öne çıkan ilk 10 spesifik tehlike etkeninin profilini göstermekte ve listenin ağırlıklı olarak mikrobiyolojik tehlikelerden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu tehlikelerden en sık görülen yüksek *Enterobacteriaceae* sayısıdır ve baskın ürün grubu köpek çiğneme ürünleridir; bu bulgu, patojen varlığından ziyade hijyen/işleme koşulları ve proses kontrolü açısından bir gösterge (indikator) uygunsuzluk yükünü düşündürmektedir. Bunu izleyen etkenler içinde *Salmonella* farklı türleriyle öne çıkmaktadır. *Salmonella* kayıtlarının baskın risk kararının çoğunlukla ciddi/uyarı olması, söz konusu etkenlerin RASFF çerçevesinde yüksek öncelikli hayvan sağlığı riski olarak ele alındığını gösterir. Ürün grubu açısından bakıldığında, köpek çiğneme ürünleri çoğu etken içinde başı çekerken; mama ve özellikle çiğ mama gibi kategoriler de risk profilinin çeşitliliğine işaret etmektedir.

Genel olarak tehlike etkenlerinin profili, hayvan beslenmesi zincirinde risk yönetiminin bir yandan patojen odaklı acil müdahale (*Salmonella*), diğer yandan hijyen göstergeleri ve proses yeterliliği (*Enterobacteriaceae*) ekseninde iki ana hatta toplandığını göstermiştir.

Tablo 1. En Sık Görülen İlk 10 Spesifik Tehlike Etkeninin Profili

Spesifik Etken	Ana Tehlike Grubu	Bildirim oranı (%)	Baskın Ürün Grubu	Baskın Risk Kararı
Yüksek <i>Enterobacteriaceae</i> Sayısı	PMO*	%14,97	Köpek çiğneme ürünleri	Ciddi değil / Bilgilendirme (takip)
<i>Salmonella spp.</i>	PMO	%11,38	Köpek çiğneme ürünleri	Ciddi / Uyarı
<i>Salmonella</i>	PMO	%9,58	Mama	Ciddi / Uyarı
<i>Salmonella enteritidis</i>	PMO	%8,38	Mama	Ciddi / Bilgilendirme (takip)
<i>Salmonella infantis</i>	PMO	%7,78	Köpek çiğneme ürünleri	Ciddi / Bilgilendirme (takip)
Yüksek <i>Enterobacteriaceae</i> Sayısı	POMO**	%6,59	Köpek çiğneme ürünleri	Ciddi değil / Bilgilendirme (dikkat)
<i>Salmonella derby</i>	PMO	%3,59	Köpek çiğneme ürünleri	Ciddi değil / Bilgilendirme (takip)
<i>Salmonella anatum</i>	PMO	%2,40	Köpek çiğneme ürünleri	Ciddi / Uyarı
<i>Salmonella typhimurium</i>	PMO	%1,80	Çiğ mama	Ciddi / Uyarı
<i>Salmonella muenster</i>	PMO	%1,80	Çiğ mama	Ciddi değil / Bilgilendirme (takip)

*Patojen mikroorganizma, **Patojen olmayan mikroorganizma

5. SONUÇ

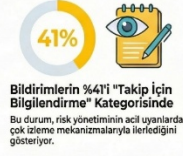
Bu çalışmada, RASFF veritabanında evcil hayvan maması kategorisinde 01.01.2020–20.12.2025 dönemine ait toplam 225 bildirim değerlendirilmiş; bildirimler zaman, bildirim türü, risk kararı, coğrafi dağılım ve tehlike profili açısından bütüncül biçimde incelenmiştir (Şekil 7). Bulgular, bildirim sayılarının

dönem boyunca dalgalı ancak süregelen bir eğilim gösterdiğini; 2024 yılında en yüksek düzeye ulaştığını ve 2025'te yüksek seyrin korunduğunu ortaya koymuştur. Bildirim türlerinde bilgilendirme–takip kategorisinin baskın olması, risk yönetiminin önemli bir bölümünün izleme/takip mekanizmaları üzerinden yürüdüğünü göstermiştir. Risk kararı dağılımı ciddi değil kararlarının en yüksek paya sahip olduğunu ancak ciddi ve potansiyel olarak ciddi kararlarının toplam içindeki anlamlı büyüklüğünün, evcil hayvan maması zincirinde kayda değer düzeyde yüksek gıda güvenliği riskinin bulunduğunu göstermiştir. Bildirim türü–risk kararı ilişkisi, uyarı bildirimlerinin ağırlıkla ciddi risklerle eşleştiğini; sınır reddi bildirimlerinin ise çoğunlukla “ciddi değil/risk yok” ekseninde kümelendiğini ve bilgilendirme–takip bildirimlerinin daha çok “ciddi değil/potansiyel risk” bandında yer aldığını doğrulamıştır. Coğrafi analiz, bildirim yapan ülkelerde belirgin bir yoğunlaşma bulunduğunu ve menşei ülkelerde de tedarik zincirinin belirli merkezlerde toplandığını göstermiştir. Tehlike profili, mikrobiyolojik tehlikelerin belirgin baskınlığını göstermiş; en sık görülen etkenin “yüksek *Enterobacteriaceae* sayısı” olması hijyen ve proses kontrolü boyutunu, *Salmonella* bildirimlerinin öne çıkması ise patojen odaklı acil risk yönetimi gereksinimini işaret etmiştir. Bu çerçevede, evcil hayvan maması güvenliğinde öncelikli odak; hijyen göstergeleri üzerinden proses yeterliliğinin güçlendirilmesi, *Salmonella* gibi patojenlere yönelik risk temelli izleme ve hızlı müdahale kapasitesinin sürdürülmesi ve izlenebilirlik/veri yeterliliğinin artırılması olmalıdır.

Evcil Hayvan Maması Güvenliği Mercek Altında: 2020-2025 RASFF Raporu

Bu infografik, Avrupa'nın gıda güvenliği alarm sistemi RASFF'e 2020-2025 yılları arasında yapılan 225 evcil hayvan maması bildirimini analiz etmektedir. Bulgular, sektördeki güvenlik risklerinin profilini çıkararak önleyici stratejiler için bir zemin oluşturmaktadır.

Bildirimlerin Panoraması (2020-2025)



Öne Çıkan Tehlikeler ve Coğrafi Dağılım

Spesifik Etken	Anlamı ve Baskın Risk Kararı
Yüksek <i>Enterobacteriaceae</i> Sayısı	Hijyen/proses sorunlarına işaret eder (Genellikle "Ciddi Değil")
<i>Salmonella</i> spp.	Doğrudan patojen varlığını gösterir (Genellikle "Ciddi")

En Büyük Tehdit: Mikrobiyolojik Tehlikeler



Şekil 7. Evcil hayvan maması bildirimlerinin (2020–2025) özet infografisi

KAYNAKÇA

- Bánáti, D., & Klaus, B. (2010). 30 Years of the Rapid Alert System for Food and Feed: An overview on the European Alert Network, combined with a case study on melamine contaminated foods. *European Food and Feed Law Review*, 10-21.
- Carrión, P. A. (2023). Pet food. In *Food safety management* (pp. 363-384). Academic Press.
- Clapp, J., Moseley, W. G., Burlingame, B., & Termine, P. (2022). The case for a six-dimensional food security framework. *Food policy*, 106, 102164.
- Çınar, S., Yılmaz, S. N., Aydın, E., & Yorulmaz, A. (2017). Gıda ve Yem İçin Hızlı Alarm Sistemi (RASFF) 2009-2016 Türkiye Raporu. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 5(8), 873-882.
- Dada, A. C., Somorin, Y. M., Ateba, C. N., Onyeaka, H., Anyogu, A., Kasan, N. A., & Odeyemi, O. A. (2021). Microbiological hazards associated with food products imported from the Asia-Pacific region based on analysis of the rapid alert system for food and feed (RASFF) notifications. *Food Control*, 129, 108243.
- DeBeer, J., Finke, M., Maxfield, A., Osgood, A. M., Baumgartel, D. M., & Blickem, E. R. (2024). A review of pet food recalls from 2003 through 2022. *Journal of Food Protection*, 87(1), 100199.
- Kowalska, A., & Manning, L. (2021). Using the rapid alert system for food and feed: Potential benefits and problems on data interpretation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(6), 906-919.
- Leiva, A., Molina, A., Redondo-Solano, M., Artavia, G., Rojas-Bogantes, L., & Granados-Chinchilla, F. (2019). Pet food

- quality assurance and safety and quality assurance survey within the Costa Rican pet food industry. *Animals*, 9(11), 980.
- Lüth, S., Boone, I., Kleta, S., & Al Dahouk, S. (2019). Analysis of RASFF notifications on food products contaminated with *Listeria monocytogenes* reveals options for improvement in the rapid alert system for food and feed. *Food Control*, 96, 479-487.
- Mikulec, A., Zborowski, M., & Kowalski, S. (2023). Rapid Alert System for Food and Feed reports as a source of information on food hazards. *Journal of Education, Health and Sport*, 13(Supplement Issue 2), 22-31.
- Papapanagiotou, E. P. (2021). Serious alert and border rejection notifications on food in the EU RASFF. *Veterinary Sciences*, 8(11), 279.
- Parisi, S., Barone, C., & Sharma, R. K. (2016). *Chemistry and food safety in the EU: The rapid alert system for food and feed (RASFF)*. Springer.
- Prata, J. C. (2024). (Micro) Plastic foreign bodies in food and feed: notifications in the European union. *Microplastics*, 3(4), 742-754.
- Piğłowski, M. (2020). Food hazards on the European Union market: The data analysis of the Rapid Alert System for Food and Feed. *Food science & nutrition*, 8(3), 1603-1627.
- Piğłowski, M. (2023). Hazards in seafood notified in the Rapid Alert System for Food and feed (RASFF) in 1996–2020. *Water*, 15(3), 548.
- Piğłowski, M. (2025). The Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF). The place in scientific research, limitations and possibilities of data use. *Scientific Papers of Silesian*

University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie, (216).

Zicker, S. C. (2008). Evaluating pet foods: how confident are you when you recommend a commercial pet food?. *Topics in companion animal medicine*, 23(3), 121-126.

FONKSİYONEL GIDALAR: TÜKETİCİ ALGISI VE BİYOAKTİF BİLEŞENLERİN SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Meryem AKBAŞ¹

1. GİRİŞ

Sağlıklı yaşamın devamlılığı, bireylerin yeterli ve dengeli beslenme alışkanlıklarını sürdürmeleriyle yakından ilişkilidir. Beslenme, organizmanın büyüme, gelişme ve metabolik işlevlerinin devamlılığı için gerekli temel besin öğelerinin alınmasını sağlarken, aynı zamanda sağlık durumunun korunması ve iyileştirilmesinde de önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde yer alan epidemiyolojik ve klinik araştırmalar, diyet örüntüleri ile kronik hastalıkların gelişimi arasında güçlü bir ilişki olduğunu desteklemektedir. Sağlıklı beslenme yaklaşımlarının; kardiyovasküler hastalıklar, obezite, diyabet ve bazı kanser çeşitleri gibi bulaşıcı olmayan hastalıkların önlenmesine ve kontrolüne katkı sağladığı bildirilmektedir (Coşkun, 2005; Neuhaus, 2019). Geleneksel olarak besinlerin ana görevi, organizmanın enerji ve besin ögesi ihtiyacını karşılamaktır. Fakat güncel çalışmalar, besinlerin bu ana işlevlerinin yanı sıra, insan sağlığı üzerine de olumlu fizyolojik etkiler gösteren çeşitli biyoaktif bileşenler içerdiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, beslenme ve sağlık arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması ve önem kazanması fonksiyonel gıdalar kavramının gelişmesine zemin hazırlamıştır (Ma, Fu & Lee, 2025). Fonksiyonel gıdalar, temel besleyici özelliklerine ek olarak, insan

¹ Öğr. Gör. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Pazarlar MYO, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0001-8626-4012

fizyolojisi üzerinde yararlı etkiler sağlayan ve hastalık riskinin azaltılmasına katkıda bulunan gıdalar veya gıda bileşenleri olarak tanımlanmaktadır (Roberfroid, 1999). Literatürde bu gıdalar; nutrasötikler, terapötik gıdalar, medikal gıdalar ve farmakonutrientler gibi farklı terimlerle de ifade edilmektedir (Roberfroid, 2002). Fonksiyonel gıdaların, metabolik faaliyetlerin düzenlenmesi, bağışıklık sisteminin desteklenmesi ve çeşitli hastalıkların önlenmesi süreçlerinde kullanımının giderek arttığı bildirilmektedir (Ma, Fu & Lee, 2025; Skenderidou, Leontopoulos & Skenderidis, 2025). Gıdalar, doğal yapılarında bulunan ya da teknolojik uygulamalarla ilave edilen biyoaktif bileşenler sayesinde fonksiyonel özellik kazanabilmektedir. Prebiyotikler, probiyotikler, biyoaktif peptitler, fitokimyasallar, çoklu doymamış yağ asitleri, vitaminler ve mineraller fonksiyonel gıdalarda yaygın olarak kullanılan başlıca bileşenler arasında yer almaktadır (Shan, 2001). Teknolojik gelişmeler, bilimsel araştırmalardaki artış ve tüketici farkındalığının yükselmesi, fonksiyonel gıdalara olan ilgiyi artırmıştır. Ayrıca obezite oranlarındaki artış, yaşam tarzındaki değişimler ve yaşlanmaya bağlı sağlık sorunlarının yaygınlaşması da fonksiyonel gıdaların önemini daha belirgin hale getirmiştir (Son, 2019).

2. FONKSİYONEL GIDA BİLEŞENLERİ VE SAĞLIK ÜZERİNE ETKİLERİ

2.1. Probiyotik ve parabiyotikler

Probiyotikler, Amerika Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından, yeterli miktarlarda alındıklarında konakçı sağlığı üzerinde yararlı etkiler gösteren canlı mikroorganizmalar olarak tanımlanmaktadır (Bıçer, Dal & Özkal Eminoğlu, 2022). Günümüzde kullanılan probiyotik mikroorganizmaların önemli bir kısmı, Amerika Birleşik

Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından genel olarak güvenli kabul edilen (GRAS) statüsüne sahip mikroorganizmalar arasında bulunmaktadır (Çakır & Çakmakçı, 2004). Probiyotiklerin fonksiyonel etki gösterebilmesi için gastrointestinal sistemde tutunabilme, patojen mikroorganizmalarla rekabet edebilme ve olumsuz sindirim koşullarına dayanıklılık göstermeleri gerekmektedir (Noce vd., 2019). Bu amaçla, probiyotiklerin canlılığını artırmak için mikrokapsülleme gibi teknolojik yöntemlerden yararlanılmaktadır (Amara & Shibl, 2015). Probiyotikler, diyet takviyeleri veya fonksiyonel gıdalar aracılığıyla tüketilebilmektedir. Fonksiyonel gıdalar ve besin takviyeleri pazarında probiyotikler, artan tüketici ilgisi ve sağlık bilincindeki yükselişe paralel olarak en hızlı büyüme gösteren ürün grupları arasında yer almaktadır (Champagne, Gomes da Cruz & Daga, 2018). Çeşitli çalışmalar, probiyotiklerin toksinlerin etkisini azaltabildiğini, bağırsak mikrobiyotasını düzenleyerek patojen mikroorganizmalarla rekabet ettiğini ve bu mekanizmalar aracılığıyla sindirim sistemi sağlığını desteklediğini göstermektedir (Santacroce, Charitos & Bottalico, 2019; Corbo vd., 2018). Probiyotik tüketiminin, laktoz intoleransına bağlı semptomların hafifletilmesi, ishalin kontrol altına alınması, bağışıklık sisteminin desteklenmesi ve bazı kronik hastalıkların gelişme riskinin azaltılmasına katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (Kara & Coşkun, 2014). Bununla birlikte, probiyotiklerin sağlık üzerindeki olumlu etkilerinin ortaya çıkabilmesi için yeterli miktarda tüketilmeleri ve canlılıklarını koruyarak bağırsak sistemine ulaşmaları gerekmektedir. Öte yandan, bağışıklık sistemi baskılanmış bireyler, prematüre bebekler ve ciddi gastrointestinal rahatsızlıkları bulunan hastalarda probiyotik kullanımına ilişkin potansiyel güvenlik riskleri olduğu vurgulanmaktadır (De Simone, 2019; Shripada, Gayatri & Sanjay, 2020). Bu bağlamda, probiyotiklere atfedilen sağlık iddialarının, güvenilir ve güçlü bilimsel kanıtlar temelinde

değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Rolim vd., 2020). Son yıllarda yapılan çalışmalar, probiyotiklerin bazı sağlık yararlarının yalnızca canlı olmalarına bağlı olmadığını ve ölü mikroorganizmaların da biyolojik yanıt oluşturabildiğini ortaya koymuştur. Bu durum literatürde “probiyotik paradoksu” olarak adlandırılmaktadır (Wilcox vd., 2020). Ancak canlı olmayan mikroorganizmalar klasik anlamda probiyotik olarak sınıflandırılmadığından, bu ürünler için “paraprobiyotik” terimi kullanılmaktadır. Paraprobiyotikler, yeterli miktarlarda alındıklarında konakçı sağlığı üzerinde olumlu etki oluşturan, canlı olmayan mikrobiyal hücreler veya hücre bileşenleri olarak tanımlanmaktadır (Taverniti & Guglielmetti, 2011; Nataraj vd., 2020). Paraprobiyotiklerin etki mekanizması tam olarak aydınlatılamamış olmasına rağmen, hücre duvarı bileşenlerinin konakçı bağışıklık sistemiyle etkileşime girerek antiinflamatuvar ve bağışıklık düzenleyici etkiler oluşturduğu düşünülmektedir (Teame vd., 2020). Canlı mikroorganizma içermemeleri nedeniyle paraprobiyotikler, daha güvenli bir tüketim profili sunmakta ve antibiyotik direnci riskini azaltmaktadır (Aguilar-Toalá vd., 2018). Ayrıca canlı olmayan probiyotikler, ısıl işleme dayanıklılıkları ve gıda matrisleriyle daha uyumlu olmaları nedeniyle fonksiyonel gıda üretiminde önemli avantajlar sağlamaktadır (Guimarães vd., 2020). Hayvan ve insan çalışmalarında paraprobiyotiklerin kolit, ishal, inflamasyon ve alerjik reaksiyonlar üzerinde olumlu etkiler gösterebildiği bildirilmiştir (Akter, Park & Jung, 2020). Son yıllarda probiyotiklerin mikrobiyota–bağırsak–beyin eksenini aracılığıyla bilişsel işlevler ve nörolojik sağlık üzerindeki etkilerine yönelik ilgi artış göstermiştir. Bu bağlamda, özellikle yaşlı bireylerde paraprobiyotiklerin potansiyel nörolojik etkilerinin değerlendirilmesi gelecekteki çalışmalar açısından önem taşımaktadır (Siciliano vd., 2021).

2.2. Prebiyotikler

Prebiyotikler, sindirime uğramadan kalabilen fakat fermente edilebilen ve bağırsak mikrobiyotasındaki faydalı mikroorganizmaların gelişimini ve/veya metabolik aktivitelerini seçici olarak teşvik eden gıda bileşenleri olarak ifade edilmektedir (Quigley, 2010). Güncel yaklaşımlara göre prebiyotikler, mide-bağırsak mikrobiyotasının bileşimini ve/veya metabolik faaliyetlerini hedefli biçimde modüle ederek konakçı sağlığı üzerinde olumlu etkiler oluşturan, seçici olarak fermente edilebilen bileşenler olarak tanımlanmaktadır (Gibson vd., 2010). Prebiyotiklerin yalnızca kolonda değil, ağız boşluğu, cilt ve ürogenital sistem gibi vücudun diğer bölgelerinde de olumlu etkiler gösterebilmesi bu tanımın genişletilmesine yol açmıştır (Valcheva & Dieleman, 2016). Prebiyotikler çoğunlukla karbonhidrat yapısında olup, probiyotik mikroorganizmalar için enerji kaynağı görevi görmektedir. Kısa ve uzun zincirli β -fruktanlar (frukto-oligosakkaritler ve inülin), galakto-oligosakkaritler ve laktuloz en yaygın prebiyotik bileşenler arasında yer almaktadır. Herhangi bir bileşiğin prebiyotik olarak kabul edilebilmesinde üst gastrointestinal sistemde sindirilmeden kolona ulaşması ve kolonda bulunan sınırlı sayıdaki yararlı mikroorganizmanın büyümesini ve/veya aktivitesini seçici olarak teşvik etmesi gerekmektedir (Roberfroid vd., 2010; Rodrigues vd., 2016). Prebiyotikleri diyet liflerinden ayıran temel özellik, bifidobakteriler gibi belirli bakteri gruplarına yönelik seçicilik göstermeleridir (Guiné vd., 2010). Prebiyotikler, kolonda probiyotik mikroorganizmalar tarafından fermente edilerek kısa zincirli yağ asitleri, laktik asit ve bakteriyosinler gibi biyolojik olarak aktif metabolitlerin oluşumunu teşvik etmekte; bu metabolitler aracılığıyla patojen mikroorganizmaların çoğalmasını baskılayıcı etki göstermektedir (Vieira, Teixeira & Martins, 2013). Bunun yanı sıra, prebiyotik tüketiminin bağışıklık sisteminin fonksiyonlarını desteklediği, magnezyum

ve kalsiyum gibi minerallerin emilimini artırdığı ve plazma lipid profili ile glisemik yanıt üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu bildirilmektedir (Scourboutakos, 2010; Oliveira vd., 2011; Chávez-González vd., 2021). Bu özellikleri sayesinde prebiyotiklerin diyabet, kardiyovasküler hastalıklar ve osteoporoz gibi kronik hastalıkların önlenmesinde potansiyel rol oynadığı belirtilmektedir. Çeşitli çalışmalar, prebiyotiklerin antimikrobiyal, antikarsinogenik, hipolipidemik ve antiosteoporotik etkiler gösterebildiğini; kabızlık, hepatik ensefalopati ve inflamatuvar bağırsak hastalıklarının yönetiminde yararlı olabileceğini ortaya koymuştur (Guiné vd., 2010). Ayrıca prebiyotik tüketiminin kolon kanseri riskinin azaltılmasına ve serum kolesterol düzeylerinin düşürülmesine katkı sağladığı bildirilmektedir (Nishimura vd., 2015; Thavarajah vd., 2016). Gıda formülasyonlarına prebiyotiklerin eklenmesi, ürünlerin duyu özelliklerini iyileştirebilmekte ve besin değerini artırabilmektedir (Al-Sheraji vd., 2013). Prebiyotikler; hindiba, soya fasulyesi, soğan, yulaf, muz, kuşkonmaz, sarımsak, bal, pırasa, enginar ve tam tahıllar gibi birçok doğal gıdada bulunmaktadır. Bu bitkisel kaynaklar, ticari prebiyotik üretiminde de önemli bir hammadde oluşturmaktadır. Prebiyotik üretimi genellikle kompleks polisakkaritlerin enzimatik hidrolizi veya monosakkarit ve disakkaritlerin transglükosilasyon reaksiyonları yoluyla gerçekleştirilmektedir (Szkaradkiewicz & Karpiński, 2013; Combrinck & Schellack, 2015). Prebiyotiklerin, probiyotik mikroorganizmaların canlılığını ve aktivitesini desteklemek amacıyla birlikte kullanılması önerilmektedir. Bu tür kombinasyonlar “simbiyotik” olarak adlandırılmakta ve fonksiyonel gıdaların etkinliğini artıran bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Davis & Milner, 2009).

2.3. Simbiyotikler

Beslenme alışkanlıkları, bağırsak mikrobiyotasının bileşimi ve çeşitliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olup, bu

durum metabolik, immünolojik ve fizyolojik süreçlerin düzenlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çerçevede, probiyotik ve prebiyotiklerin birlikte kullanımını ifade eden simbiyotiklere yönelik ilgi, bağırsak mikrobiyotası üzerindeki potansiyel sinerjik etkileri nedeniyle son yıllarda giderek artmaktadır (Nurko & Nakilcioğlu, 2023). Simbiyotikler, probiyotikler ile prebiyotiklerin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ürünler olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz & Altındış, 2017). Prebiyotiklerin probiyotik mikroorganizmalar için uygun bir substrat sağlaması, bu mikroorganizmaların gastrointestinal sistemde canlılıklarını ve etkinliklerini artırmakta ve sinerjik bir etki oluşturmaktadır. Bu sinerji, bağırsak sağlığını destekleyen yararlı mikroorganizmaların gelişimini hızlandırarak patojen mikroorganizmaların baskılanmasına ve bağırsak fonksiyonlarının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır (Altın & Yılmaz, 2023). Simbiyotik ürünlerin bileşiminde genellikle fruktooligosakkaritler, galaktooligosakkaritler ve ksilooligosakkaritler gibi prebiyotikler ile *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Saccharomyces boulardii* ve *Bacillus coagulans* gibi probiyotik suşlar birlikte kullanılmaktadır (Martyniak vd., 2021). Bal ve anne sütü gibi bazı gıdalar ise doğal simbiyotik özellik gösteren besinler arasında yer almaktadır (Çeltik, Tayfun & Müslümanoğlu, 2022). Simbiyotik özellik gösteren gıdaların tüketimi, bağırsak mikrobiyotasında *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* türlerinin artmasına katkı sağlayarak daha dengeli bir mikrobiyota oluşumunu desteklemektedir (Mohanty vd., 2018). Simbiyotiklerin; karaciğer fonksiyonlarının iyileştirilmesine katkı sağladığı, serum LDL kolesterol düzeylerini azalttığı, kan basıncının düzenlenmesine yardımcı olduğu, bağışıklık sistemini desteklediği ve obezite riskini azaltabileceği bildirilmektedir (Çeltik, Tayfun & Müslümanoğlu, 2022; Crovesy, El-Bacha & Rosado, 2021). Bazı çalışmalarda, simbiyotiklerin glisemik yanıtın düzenlenmesinde tek başına

kullanılan probiyotiklere kıyasla daha etkili olabileceği vurgulanmaktadır (Kassaian vd., 2018).

2.4. Vitaminler

Vitaminler, vücutta sentezlenemeyen ve normal fizyolojik işlevlerin sürdürülebilmesi için mikro düzeyde alınması gereken organik bileşiklerdir (Awuchi, 2019). Vitaminler, çözünürlük özelliklerine göre yağda çözünen (A, D, E, K) ve suda çözünen (B grubu ve C vitamini) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Suda çözünen vitaminler vücutta depolanmadıkları için düzenli olarak alınmaları gerekmektedir. Buna karşılık yağda çözünen vitaminler, yağların varlığında emilmekte ve karaciğerde depolanabilmektedir. Bu durum, özellikle aşırı alımlarda hipervitaminsiz riskini beraberinde getirmektedir (Maqbool & Stallings, 2008). Vitaminler, vücutta birçok biyokimyasal süreçte görev almaktadır. A vitamini hücre farklılaşması ve görme fonksiyonlarında rol oynarken; B grubu vitaminler enerji metabolizması ve sinir sistemi fonksiyonlarında koenzim olarak görev yapmaktadır. D vitamini mineral metabolizmasının düzenlenmesinde önemliken, C ve E vitaminleri antioksidan özellikleriyle hücreleri oksidatif hasara karşı korumaktadır (Bender, 2003). Yeterli ve dengeli beslenmenin sağlanamadığı durumlarda vitamin eksiklikleri ortaya çıkmakta ve ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Vitamin eksikliklerinde görülebilen başlıca klinik tablolar şu şekilde özetlenebilir (Kiani vd., 2022):

B1 (tiamin), beriberi, sinir sistemi ve kardiyovasküler bozukluklar; **B2 (riboflavin)**, ağızda çatlaklar, dermatit; **B3 (niasin)**, pellagra; **B6 (piridoksin)**, anemi, nörolojik bozukluklar; **B7 (biyotin)**, dermatit, saç dökülmesi; **B9 (folat)**, nöral tüp defektleri, megaloblastik anemi; **B12 (kobalamin)**, pernisiyöz anemi, nörolojik hasar; **C vitamini**, iskorbüt; **A vitamini**, gece körlüğü, bağışıklık zayıflığı; **D vitamini**, raşitizm

ve osteomalazi; **E vitamini**, nörolojik iletim bozuklukları; **K vitamini**, kanama eğilimi.

Gelişmiş ülkelerde gıdaların vitaminlerle zenginleştirilmesi ve takviye kullanımının yaygınlaşması sayesinde vitamin eksiklikleri nispeten nadir görülürken, gelişmekte olan ülkelerde bu eksiklikler hâlen önemli bir halk sağlığı sorunudur (Lakhan & Vieira, 2008). Bu nedenle vitaminler, sağlığın korunması ve hastalıkların önlenmesi açısından elzem besin öğeleri arasında yer almaktadırlar.

2.5. Mineraller

Mineraller, vücutta sentezlenemeyen ancak yaşamın sürdürülebilmesi açısından zorunlu olan inorganik elementlerdir. Bu nedenle temel besin öğeleri arasında yer almakta olup, gıdalar ve takviyeler yoluyla alınmaları gerekmektedir (Zoroddu vd., 2019). Mineraller, vücuttaki miktarlarına göre eser elementler ve makro mineraller olarak sınıflandırılmaktadır. Kalsiyum, fosfor, sodyum, potasyum ve magnezyum başlıca makro mineralleri oluştururken; iyot, bakır, demir, çinko, selenyum ve manganez gibi mineraller eser elementler grubunda yer almaktadır. Bu mineraller, enzimatik reaksiyonlar, elektrolit dengesi, kemik yapısı, oksijen taşınması ve bağışıklık sistemi gibi çok sayıda biyokimyasal süreçte görev almaktadır (Berdanier vd., 2016). Mineraller, beslenme yoluyla doğal olarak alınabildiği gibi gıdaların zenginleştirilmesi veya besin takviyeleri yoluyla da sağlanabilmektedir. Beslenme uzmanları, minerallerin öncelikle mineralce zengin gıdalar aracılığıyla alınmasını önermektedir. Mineral yetersizlikleri, yetersiz mineral alımı, emilim bozuklukları veya metabolik kullanım sorunları nedeniyle ortaya çıkmakta olup dünya genelinde ciddi bir halk sağlığı problemi oluşturmaktadır. Mineral eksikliklerinde görülebilen başlıca sağlık sorunlar şu şekilde özetlenebilir (Razzaque & Wimalawansa, 2025):

Çinko, bağışıklık sistemi zayıflığı, büyüme geriliği, cilt lezyonları, tat ve koku duyusunda azalma; **kalsiyum**: kemik mineral yoğunluğunda azalma, osteoporoz; **klorür**: metabolik alkaloz; **potasyum**: kas krampları, halsizlik, kardiyak ritim bozuklukları; **demir**: anemi, yorgunluk, solukluk; **iyot**: guatr, nörolojik gelişim bozuklukları, gebelikte fetal riskler.

Mineraller, büyüme ve gelişmenin sağlanması, metabolik dengenin korunması ve hastalıkların önlenmesi açısından elzem besin öğeleri arasında yer almaktadır. Bu nedenle yeterli miktarda alınmalarına özen gösterilmelidir.

2.6. Esansiyel yağ asitleri

Yağlar, insan beslenmesinde önemli bir enerji kaynağı olmanın yanı sıra hücre zarlarının yapısına katılmaları, metabolik süreçlerde rol almaları ve yağda çözünen vitaminlerin emilimini sağlamaları nedeniyle temel besin öğeleri arasında yer almaktadır. Yağların biyolojik özellikleri, yapılarında bulunan yağ asitlerinin türü ve miktarına bağlıdır (Öztürk, 2014). Yağ asitleri, yapılarındaki çift bağ durumuna göre doymuş ve doymamış yağ asitleri olarak sınıflandırılmaktadır. Doymamış yağ asitleri de tekli ve çoklu doymamış yağ asitleri şeklinde iki gruba ayrılmaktadır (Çakmakçı & Kahyaoğlu, 2012). Zeytinyağı, kanola, ayçiçeği ve soya yağı gibi bitkisel yağlar ile balıklar doymamış yağ asitleri açısından zengin besinlerdir (Şahingöz, 2007). Çoklu doymamış yağ asitleri, ilk çift bağın konumuna göre omega-3 ve omega-6 yağ asitleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yağ asitleri vücutta sentezlenemediklerinden temel yağ asitleri olarak adlandırılmakta ve besinler yoluyla alınmaları gerekmektedir (Brown, 2000). Omega-3 yağ asitleri balıklar ve bazı bitkisel kaynaklarda (ceviz, keten tohumu, soya), omega-6 yağ asitleri ise ağırlıklı olarak bitkisel yağlarda (mısır, ayçiçeği, pamuk yağı) bulunmaktadır (Gogus & Smith, 2010). Omega-3 yağ asitleri arasında yer alan dokosaheksaenoik asit (DHA),

eikosapentaenoik asit (EPA) ve dokosapentaenoik asit (DPA) insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. Söz konusu yağ asitleri, besin zinciri yoluyla taşınarak başta yağlı balıklar olmak üzere çeşitli deniz ürünlerinde birikmektedir (Gordon & Ratliff, 1992). Esansiyel yağ asitlerinin düzenli alımı; hücre zarlarının bütünlüğünün korunması, inflamatuvar süreçlerin düzenlenmesi ve eikosanoid sentezi gibi birçok fizyolojik süreçte rol oynamaktadır (Brown, 2000). DHA, özellikle beyin ve retina dokusunun temel bileşenlerinden biri olup, yetersizliğinde bilişsel işlevlerde bozulma ve görme problemleri ortaya çıkabilmektedir (Kaya, Duyar & Erdem, 2004). Omega-3 ve omega-6 yağ asitlerinin, kardiyovasküler hastalıklar, inflamatuvar hastalıklar ve metabolik bozuklukların önlenmesinde koruyucu etkiler gösterdiği bildirilmektedir (Wassell vd., 2010).

2.7. Fenolik bileşikler

Fenolik bileşikler, bitkilerde sekonder metabolitler olarak sentezlenen ve yapılarında bir veya daha fazla hidroksil grubu içeren aromatik bileşiklerdir. Bu bileşikler, bitkilerin çevresel streslere karşı savunmasında rol oynarken, renk, tat ve aroma özelliklerine de katkı sağlar. Gıdalarda bulunan fitokimyasalların önemli bir bölümünü fenolik bileşikler oluşturmaktadır olup, bu bileşikler sağlık üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (Atak, Yıldız & Uslu, 2017). Fenolik bileşikler genel olarak flavonoidler ve flavonoid olmayan bileşikler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Flavonoid olmayan grupta stilbenler, fenolik asitler ve lignanlar yer alırken; flavonoidler ise flavonoller, flavanoller, flavonlar, izoflavonlar, flavanonlar ve antosiyanidinleri kapsamaktadır (Karabulut & Yemiş, 2019). Fenolik ve polifenolik bileşikler; tahıl, sebze, meyve ve diğer bitkisel kaynaklı gıdalarda doğal olarak bulunmakta olup, tek başlarına veya C ve E vitaminleri gibi diğer antioksidan bileşiklerle birlikte hücreleri oksidatif stresin zararlı etkilerine karşı koruyucu rol oynamaktadır (Soto-

Hernandes, Palma-Tenango & Garcia-Mateos, 2017). Bitkisel bazlı diyetlerin, fenolik bileşikler bakımından zengin olmaları nedeniyle kronik hastalıkların önlenmesine katkı sağladığı bildirilmektedir. Gerçekleştirilen farklı çalışmalar, polifenoller bakımından zengin diyetlerin kardiyovasküler hastalıklar, nörodejeneratif hastalıklar, diyabet, osteoporoz ve bazı kanser türlerine karşı koruyucu etkiler gösterebileceğini ortaya koymuştur (Arts & Hollman, 2005). Ayrıca polifenollerin antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleri sayesinde yaşlanmaya bağlı bilişsel ve nörolojik bozuklukların geciktirilmesinde rol oynayabileceği belirtilmektedir. Sistematik derlemeler, polifenolce zengin diyet veya takviyelerin yaşlı yetişkinlerde bilişsel işlevleri ve beyin sağlığını desteklemede potansiyel faydalar sunduğunu rapor etmektedir (Rodrigo-Gonzalo vd., 2022).

2.8. Fitosteroller

Fitosteroller, bitkilerin sekonder metabolizması sırasında sentezlenen, steroid yapıda ve biyolojik olarak aktif bileşiklerdir. Gıdalarda en yaygın olarak bulunan fitosteroller arasında kampesterol, sitosterol ve stigmasterol yer almaktadır (Topçu & Çölgeçen, 2015). Bu bileşikler bitkisel gıdalarda serbest halde veya yağ asidi esterleri şeklinde bulunabilmektedir. Fitosteroller yalnızca besinlerle alınmakta olup, bağırsaklardan emilim oranları düşüktür. Emilimlerinin sınırlı olması, yapılarındaki doymamış bağlar ve alkil grupları ile ilişkilendirilmektedir (Tetik, Erbaş & Turhan, 2007). Fitosterollerin en iyi bilinen fizyolojik etkisi, serum kolesterol düzeylerini düşürmeleridir. Bağırsaklarda kolesterol ile yarışarak esterleşmeleri, kolesterolün emilimini azaltmakta ve böylece LDL kolesterol düzeylerinde düşüş sağlamaktadır (Patel & Thompson, 2006). Fitosterol türevleri veya fitostanol esterlerinin LDL-kolesterolü düşürmesi yoluyla aterosklerotik kardiyovasküler hastalık riskini azaltabileceği bildirilmektedir (Simonen vd., 2024). Bunun yanı

sıra fitosterollerin safra asidi metabolizması üzerindeki etkileri yoluyla kolon ve prostat kanseri riskini azaltabileceği, ayrıca lipid metabolizmasını düzenleyerek kilo kontrolüne katkı sağlayabileceği belirtilmektedir (Jia vd., 2005). Bu özellikleri nedeniyle fitosteroller, fonksiyonel gıdalarda yaygın olarak değerlendirilen biyoaktif bileşenler arasında yer almaktadır.

2.9. Fitoöstrojenler

Fitoöstrojenler, bitkilerde doğal olarak bulunan ve yapısal olarak östrojene benzeyen fenolik bileşiklerdir. Endokrin sistem tarafından sentezlenmezler; ancak östrojen reseptörlerine bağlanarak hormon benzeri etkiler gösterebilirler (Rowland vd., 2003). Fitoöstrojenler genel olarak izoflavonlar, prenil flavonoidler, kumestanlar, lignanlar ve stilbenler olmak üzere beş ana grupta incelenmektedir (Antmen & Ögenler, 2018). Bu bileşikler başta soya ve soya ürünleri olmak üzere baklagiller, tam tahıllar, keten tohumu ve bazı sebze meyvelerde yaygın olarak bulunmaktadır. Fitoöstrojenlerin biyolojik etkileri; alınan miktara, bireyin metabolik durumuna, hedef dokuya ve endojen östrojen düzeyine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Özer & Konuklugil, 2007). İzoflavonlar, menopoza evresinde görülen sıcak basması vb. semptomların hafifletilmesinde ve kemik sağlığının korunmasında destekleyici etki gösterebilmektedir (Cornwell, Cohick & Raskin, 2004). Fitoöstrojenler, antioksidan, antiinflamatuvar ve antiproliferatif özellikleri sayesinde kardiyovasküler hastalıklar ve hormona bağlı kanserler üzerinde potansiyel etkiler göstermektedir. Ancak, bu bileşiklerin bireyin hormonal durumuna göre östrojenik veya antiöstrojenik etki gösterebilmesi, özellikle menopoza sonrası dönemde kontrollü ve bilinçli tüketilmelerini gerekli kılmaktadır (Antmen & Ögenler, 2018).

3. GIDA NEOFOBİSİ VE FONKSİYONEL GIDALAR İLE İLİŞKİSİ

Gıda neofobisi, kişilerin daha önce denemedikleri yabancı gıdaları tüketme konusunda isteksizlik göstermeleri ve bu tür gıdalardan kaçınmaları olarak tanımlanmaktadır. Bu davranışın temelinde, bilinmeyen gıdaların olası olumsuz etkilerine yönelik algı ve riskten kaçınma eğilimi yer almaktadır. Gıda neofobisinin düzeyi; bireyin yeni gıdalardan sağlayacağı faydaya ilişkin algısı, sosyal çevrenin etkisi, kültürel geçmişi, gıdanın niteliği ve kişisel özellikler gibi birçok faktör tarafından şekillenmektedir (Onurlu & Aslay, 2022). Gıda neofobisinin yaşam süreci boyunca değişkenlik gösterdiği bildirilmektedir. En düşük düzeyin 0–6 ay bebeklik döneminde görüldüğü, ek besinlere geçişle birlikte neofobinin hızla arttığı ve özellikle 2–6 yaş arasında en yüksek seviyede belirlendiği belirtilmektedir (De Almeida vd., 2024). Çocukluk döneminden sonra neofobi eğiliminin giderek azaldığı; ancak ileri yaşlarda, özellikle 66–80 yaş aralığında yeniden artış gösterebildiği bildirilmektedir. Bu artışın, yaşlanmayla birlikte gelişen tat ve koku algısındaki azalma ile ilişkili olduğu ve yaşlı bireylerin yeni gıdaları deneme isteğinin düşmesiyle bağlantılı olduğu ifade edilmektedir (Sivrikaya, 2019). Günümüzde fonksiyonel gıdalar, gıda endüstrisinin en önemli stratejik odak alanlarından biri hâline gelmiştir. Fonksiyonel gıda pazarının küresel ölçekte hızla büyümeye devam ettiği ve 2025–2035 döneminde yaklaşık %8–10 arasında yıllık büyüme oranı ile genişlemesinin beklendiği bildirilmektedir (Functional Foods Market Forecast 2025–2035, 2025). Fonksiyonel gıdalara yönelik tüketici tutumları incelendiğinde, bu ürünlerin faydaları ve içerikleri hakkında bilgi düzeyinin artmasının satın alma talebini olumlu yönde etkilediği görülmektedir (Goetzke, Nitzko & Spiller, 2014). Bununla birlikte, gıda neofobisi fazla olan kişilerin yeni veya alışılmadık özellikler taşıyan fonksiyonel gıdalara karşı temkinli yaklaşıtları belirtilmektedir. Ancak literatürde, gıdaya

maruz kalma sıklığının artmasıyla birlikte neofobi düzeyinin azalabileceği veya tamamen ortadan kalkabileceği vurgulanmaktadır. Fonksiyonel gıdaların tüketici tarafından benimsenmesinde; etkili pazarlama stratejileri, güvenilir bilgi sunumu ve bilinçlendirmeye yönelik çalışmalar neofobiyi azaltmada önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla, fonksiyonel gıdalar ile gıda neofobisi arasındaki ilişkinin, tüketici davranışları ve halk sağlığı açısından ele alınması önem taşımaktadır (Pliner & Hobden, 1992; Onurlu & Aslay, 2022).

4. SONUÇ

Fonksiyonel gıdalar ve biyoaktif bileşenler, günümüzde sağlık ile beslenme arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayan önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu kitap bölümünde; probiyotikler, prebiyotikler, simbiyotikler, vitaminler, mineraller, esansiyel yağ asitleri, fenolik bileşikler, fitosteroller ve fitoöstrojenler gibi başlıca fonksiyonel gıda bileşenleri ele alınmış; bu bileşenlerin etki mekanizmaları ve sağlık üzerindeki potansiyel yararları güncel bilimsel bulgular ışığında değerlendirilmiştir. İncelenen bileşenlerin; bağışıklık sisteminin desteklenmesi, metabolik dengenin korunması, kronik hastalık risklerinin azaltılması ve genel sağlık durumunun iyileştirilmesi açısından önemli roller üstlendiği görülmektedir. Bununla birlikte, fonksiyonel gıdaların toplum tarafından benimsenmesi yalnızca biyolojik etkinlikleriyle sınırlı olmayıp, tüketici algısı ve davranışlarıyla da yakından ilişkilidir. Bu bağlamda gıda neofobisi, fonksiyonel gıdaların kabulü ve tüketimi üzerinde belirleyici faktörlerden biridir. Bilgilendirme, eğitim ve uygun pazarlama stratejileri ile gıda neofobisinin azaltılabileceği ve fonksiyonel gıdaların daha geniş kitleler tarafından benimsenebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, fonksiyonel gıdalar ve biyoaktif bileşenler, koruyucu beslenme yaklaşımlarının önemli bir parçası olup, halk sağlığının geliştirilmesinde potansiyel bir araç sunmaktadır. Ancak bu alandaki sağlık iddialarının bilimsel kanıtlarla desteklenmesi, güvenli tüketim sınırlarının belirlenmesi ve tüketici farkındalığının artırılması büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Aguilar-Toalá, J.E., Garcia-Varela, R., Garcia, H.S., et al. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105–114.
- Akter, S., Park, J.H., & Jung, H.K. (2020). Potential health-promoting benefits of paraprobiotics, inactivated probiotic cells. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30, 477–481.
- Al-Sheraji, S.H., Ismail, A., Manap, M.Y., Mustafa, S., Yusof, R.M., & Hassan, F.A., (2013). Prebiotics as functional foods: A review. *Journal of Functional Foods*, 5, 1542–1553.
- Altın, M., & Yılmaz, M. (2023). Diabetes Mellitus ve Probiyotik, Prebiyotik, Simbiyotikler. *Current Perspectives on Health Sciences*, 4(2), 54-63.
- Amara, A.A., & Shibl, A. (2015). Role of probiotics in health improvement, infection control and disease treatment and management. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 23, 107–114.
- Antmen, Ş.E., & Ögenler, O. (2018). İnsan sağlığında fitoöstrojenlerin önemi. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi*, 8(3), 185-190.
- Arts, I.C.W., & Hollman, P.C.H. (2005). Polyphenols and disease risk in epidemiologic studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81, 317–325.
- Atak, E., Yıldız, E., & Uslu, M. (2017). Fenolik Bileşiklerin Enkapsülasyonu. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2, 82-92.

- Awuchi, C.G. (2019a). Medicinal plants: The medical, food, and nutritional biochemistry and uses. *International Journal of Advanced Academic Research*, 5(11), 220–241.
- Bender, D.A. (2003). *Nutritional biochemistry of the vitamins*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Berdanier, C.D., Dwyer, J.T., & Heber, D. (Eds.). (2016). *Handbook of nutrition and food (3rd ed.)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Biçer, D., Dal, G., & Özkal Eminoğlu, D. (2022). Probiyotikler ve periodontal sağlık. *Selçuk Dental Journal*, 9(2), 706–712.
- Brown, A. (2000). *Understanding food: Fish and shellfish*. Wadsworth, CA: Thomson Learning.
- Champagne, C.P., Gomes da Cruz, A. & Daga, M. (2018). Strategies to improve the functionality of probiotics in supplements and foods. *Current Opinion in Food Science*, 22, 160–166.
- Combrinck, Y., & Schellack, N. (2015). Probiotics and prebiotics: A review. *Professional Nursing Today*, 19, 16–20.
- Corbo, M.R., Campaniello, D., Speranza, B., Altieri, C., Sinigaglia, M., & Bevilacqua, A. (2018). Neutralisation of toxins by probiotics during the transit into the gut: challenges and perspectives. *International Journal of Food Science & Technology*, 53, 1339–1351.
- Cornwell, T., Cohick, W., & Raskin, I. (2004). Dietary phytoestrogens and health. *Phytochemistry*, 65, 995-1016.
- Coşkun, T. (2005). Fonksiyonel Besinlerin Sağlığımız Üzerine Etkileri. *Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi*, 48, 69-84.

- Crovesy, L., El-Bacha, T., & Rosado, E.L. (2021). Modulation of the gut microbiota by probiotics and synbiotics is associated with changes in serum metabolite profile related to a decrease in inflammation and overall benefits to metabolic health: A double-blind randomized controlled clinical trial in women with obesity. *Food & Function*, 12(5), 2161–2170.
- Çakır, İ., & Çakmakçı, M.L. (2004). Probiyotikler: tanımı, etki mekanizması, seçim ve güvenilirlik kriterleri. *Gıda*, 29(6): 427-434.
- Çakmakçı, S., & Kahyaoğlu, D.T. (2012). Yağ asitlerinin sağlık ve beslenme üzerine etkileri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 2, 133-137.
- Çeltik, C., Tayfun, K., & Müslümanoğlu, A.Y. (2022). Simbiyotik özellikli gıdalar. *Bütünleyici ve Anadolu Tıbbi Dergisi*, 3(2), 3–12.
- Davis, C.D., & Milner, J.A., (2009). Gastrointestinal microflora, food components and colon cancer prevention, *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 20, 743–752.
- De Almeida, P.C., Nakano, E.Y., Vasconcelos, I.A.L., Zandonadi, R.P., Raposo, A., Saraiva, A., Alturki, H.A., & Botelho, R.B.A. (2024). Food Neophobia in Children: A Case Study in Federal District/Brazil. *Nutrients*, 16(17), 2962.
- De Simone, C. (2019). The unregulated probiotic market. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 17, 809–817.
- Functional Foods Market Forecast 2025–2035. (2025). Fact.MR. Retrieved December 26, from <https://www.factmr.com/report/functional-foods-market#:~:text=Functional%20Foods%20Market%20Size%20and,segment%20with%20a%2027.0%25%20share>

- Gibson, G.R., Scott, K.P., Rastall, R.A., Tuohy, K.M., Hotchkiss, A., Dubert-Ferrandon, A., Gareau, M., Murphy, E.F., Saulnier, D., Loh, G., Macfarlane, S., Delzenne, N., Ringel, Y., Kozianowski, G., Dickmann, R., Lenoir-Wijnkook, I., Walker, C., & Buddington, R. (2010). Dietary prebiotics: Current status and new definition. *Food Science and Technology Bulletin: Functional Foods*, 7, 1–19.
- Goetzke, B., Nitzko, S., & Spiller, A. (2014). Consumption of organic and functional food: A matter of well-being and health. *Appetite*, 77, 96–105.
- Gogus, U., & Smith, C. (2010). Omega fatty acids: A review of current knowledge. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 417–436.
- Guimarães, J.T., Balthazar, C.F., Silva, R., Rocha, R.S., Graça, J. S., Esmerino, E.A., Silva, M.C., Sant’Ana, A.S., Duarte, M.C. K., Freitas, M.Q., et al. (2020). Impact of probiotics and prebiotics on food texture. *Current Opinion in Food Science*, 33, 38–44.
- Guiné, R.P.F., Lima, M.J., & Barroca, M.J. (2010). Functional components of foods. *Food, diet and health: Past, present and future tendencies* içinde (ss. 59–135). New York, NY: Nova Science Publishers.
- Jia, X., Ebine, N., Wang, Y., Awad, A.B., & Jones, P.J.H. (2005). Effects of different phytosterol analogs on colonic mucosal cell proliferation in hamster. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 17(6), 396–401.
- Kara, A., & Coşkun, T. (2014). *Teoriden kliniğe prebiyotikler, probiyotikler (1. bs.)*. İstanbul: Akademisyen Kitabevi.

- Karabulut, G., & Yemiş, O. (2019). Fenolik bileşiklerin bağlı formları ve biyoyararlılığı. *Akademik Gıda*, 17(4), 526-537.
- Kassaian, N., Feizi, A., Aminorroaya, A., & Amini, M. (2018). Probiotic and synbiotic supplementation may improve metabolic syndrome in prediabetic adults: A randomized controlled trial. *Diabetes & Metabolic Syndrome*, 13(5), 2991–2996.
- Kaya, Y., Duyar, H.A., & Erdem, M.E. (2004). Balık yağ asitlerinin insan sağlığı için önemi. *Ege Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 21 (3/4): 365-370.
- Kiani, A.K., Dhuli, K., Donato, K., Aquilanti, B., Velluti, V., Matera, G., ... & Bertelli, M. (2022). Main nutritional deficiencies. *Journal of preventive medicine and hygiene*, 63(2- 3), 93.
- Ma, Z.F., Fu, C., & Lee, Y.Y. (2025). The modulatory role of bioactive compounds in functional foods on inflammation and metabolic pathways in chronic diseases. *Foods*, 14(5), 821.
- Maqbool, A., & Stallings, V.A. (2008). Update on fat-soluble vitamins in cystic fibrosis. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 14(6), 574–581.
- Martyniak, A., Medyńska-Przęczek, A., Wędrychowicz, A., Skoczeń, S., & Tomasik, P.J. (2021). Prebiotics, probiotics, synbiotics, paraprobiotics and postbiotic compounds in IBD. *Biomolecules*, 11(12), 1903.
- Mohanty, D., Misra, S., Mohapatra, S., & Sahu, P.S. (2018). Prebiotics and synbiotics: Recent concepts in nutrition. *Food Bioscience*, 26, 152–160.
- Nataraj, B.H., Ali, S.A., Behare, P.V., & Yadav, H. (2020). Postbiotics–parabiotics: The new horizons in microbial

- biotherapy and functional foods. *Microbial Cell Factories*, 19, 168.
- Neuhouser, M.L. (2019). The importance of healthy dietary patterns in chronic disease prevention. *Nutrition research*, 70, 3-6.
- Nishimura, M., Ohkawara, T., Kanayama, T., Kitagawa, K., Nishimura, H., & Nishihira, J. (2015). Effects of the extract from roasted chicory (*Cichorium intybus* L.) root containing inulin type fructans on blood glucose, lipid metabolism, and fecal properties. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 5(3), 161–167.
- Noce, A., Marrone, G., Di Daniele, F., Ottaviani, E., Wilson Jones, G., Bernini, R., Romani, A., & Rovella, V. (2019). Impact of gut microbiota composition on onset and progression of chronic non-communicable diseases. *Nutrients*, 11, 1073.
- Nurko, E., & Nakilcioğlu, E. (2023). Gıda Endüstrisinde Simbiyotikler, Postbiyotikler ve Paraprobiyotikler. *Gıda*, 48(1).
- Oliveira, R.P.d.S., Perego, P., Oliveira, M.N.d., & Converti, A. (2011). Effect of inulin as prebiotic and synbiotic interactions between probiotics to improve fermented milk firmness. *Journal of Food Engineering*, 107, 36–40.
- Onurlu, Ö., & Aslay, E.Ş. (2022). Gıda Neofobisi ve Fonksiyonel Gıdaları Kullanma İsteği. *Hakkari Review*, 6(1), 14-26.
- Özer Ö, & Konuklugil B. (2007). Phytoestrogens and Their Effects On Menopause. *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 36, 199-222.
- Öztürk, M.O. (2014). Esansiyel Yağ Asitlerinin İnsan Metabolizması ve Beslenmesi Üzerine Etkileri. *Kocatepe Veteriner Dergisi*, 7(2), 37-40.

- Patel, M.D., & Thompson, P.D. (2006). Phytosterols and vascular disease. *Atherosclerosis*, 186 (1) 12-19.
- Quigley, E.M.M. (2010). Prebiotics and probiotics, modifying and mining the microbiota. *Pharmacological Research*, 61, 213–218.
- Roberfroid, M. (2002). Functional food concept and its application to prebiotics. *Digestive and Liver Disease*, 34, S105–S110.
- Roberfroid, M., Gibson, G.R., Hoyles, L., McCartney, A.L., Rastall, R., Rowland, I., Wolvers, D., Watzl, B., Szajewska, H., Stahl, B., Guarner, F., Respondek, F., Whelan, K., Coxam, V., Davicco, M.-J., Léotoing, L., Wittrant, Y., Delzenne, N.M., Cani, P.D., Neyrinck, A.M., & Meheust, A. (2010). Prebiotic effects: Metabolic and health benefits. *British Journal of Nutrition*, 104(Suppl. 2), S1–S63.
- Roberfroid, M.B. (1999). What is beneficial for health? The concept of functional food. *Food and Chemical Toxicology*, 37(9-10), 1039-1041.
- Rodrigo-Gonzalo, M.J., González-Manzano, S., Mendez-Sánchez, R., Santos-Buelga, C., & Recio-Rodríguez, J. I. (2022). Effect of Polyphenolic Complements on Cognitive Function in the Elderly: A Systematic Review. *Antioxidants*, 11(8), 1549.
- Rodrigues, D., Walton, G., Sousa, S., Rocha-Santos, T.A.P., Duarte, A.C., Freitas, A.C., & Gomes, A.M.P. (2016). In vitro fermentation and prebiotic potential of selected extracts from seaweeds and mushrooms. *LWT – Food Science and Technology*, 73, 131–139.
- Rolim, F.R., Neto, O.C.F., Oliveira, M.E.G., Oliveira, C.J., & Queiroga, R.C. (2020). Cheeses as food matrixes for

- probiotics: In vitro and in vivo tests. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 138–154.
- Rowland, I., Faughan, M., Hoey, L., & Wahala, K. (2003). Bioavailability of phyto-oestrogens. *British Journal of Nutrition*, 89(1), 45–58.
- Santacroce, L., Charitos, I.A., & Bottalico, L. (2019). A successful history: Probiotics and their potential as antimicrobials. *Expert Review of Anti-Infective Therapy*, 17, 635–645.
- Scourboutakos, M. (2010). 1 + 1 = 3... Synbiotics: Combining the power of pre- and probiotics. *Journal of Food Science Education*, 9, 36–37.
- Shripada, R., Gayatri, A.J., & Sanjay, P. (2020). Paraprobiotics. J. Faintuch & S. Faintuch (Eds.), *Precision medicine for investigators, practitioners and providers* içinde (ss. 39–49). Cambridge, MA: Academic Press.
- Siciliano, R.A., Reale, A., Mazzeo, M.F., Morandi, S., Silvetti, T., & Brasca, M. (2021). Paraprobiotics: A new perspective for functional foods and nutraceuticals. *Nutrients*, 13(4), 1225.
- Simonen, P., Nylund, L., Vartiainen, E., Kovanen, P.T., Strandberg, T.E., Öörni, K., Wester, I., & Gylling, H. (2024). Heart-healthy diets including phytosterol ester consumption to reduce the risk of atherosclerotic cardiovascular diseases. A clinical review. *Lipids in Health and Disease*, 23, 341.
- Sivrikaya, K.K. (2019). Gıda neofobisi ve heyecan arama kişilik özelliklerinin yabancı turistlerin geleneksel Türk yemeklerini satın alma niyetine etkisi. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.

- Skenderidou, I., Leontopoulos, S., & Skenderidis, P. (2025). Functional food ingredients enhancing immune health: A systematic review. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(17), 8408.
- Son, N.E. (2019). Fonksiyonel gıdalar. C. Yaman & N. Erenoğlu Son (Eds.), *Beslenme, obezite ve toplum sağlığı* içinde (s. 114). Ankara: Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları.
- Soto-Hernandes, M., Palma-Tenango, M., & Garcia-Mateos, M.S. (2017). *Phenolic Compounds*. Hırvatistan: Intechopen.
- Szkaradkiewicz, A.K., & Karpiński, T.M. (2013). Probiotics and prebiotics. *European Journal of Biological Research*, 3, 6.
- Şahingöz, S.A. (2007). Omega-3 yağ asitlerinin insan sağlığına etkileri. *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 21, 1-13.
- Taverniti, V., & Guglielmetti, S. (2011). The immunomodulatory properties of probiotic microorganisms beyond their viability (ghost probiotics: proposal of paraprobiotic concept). *Genes & nutrition*, 6(3), 261-274.
- Teame, T., Wang, A., Xie, M., Zhang, Z., Yang, Y., Ding, Q., Gao, C., Olsen, R.E., Ran, C., & Zhou, Z. (2020). Paraprobiotics and postbiotics of probiotic Lactobacilli, their positive effects on the host and action mechanisms: A review. *Frontiers in Nutrition*, 7, 570344.
- Tetik, N., Erbaş, M., & Turhan, İ. (2007). Fonksiyonel gıda bileşeni olarak fitosteroller. *Gıda*, 32(6), 317-324.
- Thavarajah, D., Thavarajah, P., Abare, A., Basnagala, S., Lacher, C., Smith, P., & Combs, G.F., Jr. (2016). Mineral micronutrient and prebiotic carbohydrate profiles of USA-

- grown kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 52, 9–15.
- Topcu, Ş., & Çölgeçen, H. (2015). Bitki sekonder metabolitlerinin biyoreaktörlerde üretilmesi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 2, 9-29.
- Valcheva, R., & Dieleman, L.A. (2016). Prebiotics: Definition and protective mechanisms. *Best Practice & Research: Clinical Gastroenterology*, 30(1), 27–37.
- Vieira, A.T., Teixeira, M.M., & Martins, F.S. (2013). The role of probiotics and prebiotics in inducing gut immunity. *Front Immunology*, 4, 445.
- Wassell, P., Bonwick, G., Smith, C.J., Almiron-Roig, E., & Young, N.V.G. (2010). Towards a multidisciplinary approach to structuring in reduced saturated fat-based systems – a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 45, 642–655.
- Wilcox, H., Carr, C., Seney, S., Reid, G., & Burton, J. (2020). Expired probiotics: What is really in your cabinet? *FEMS Microbes*, 1, xtaa007.
- Yılmaz, K., & Altındış, M. (2017). Sindirim sistemi mikrobiyotasi ve fekal transplantasyon. *Nobel Medicus*, 13(1), 9-15.
- Zoroddu, M.A., Aaseth, J., Crisponi, G., Medici, S., Peana, M., & Nurchi, V.M. (2019). The essential metals for humans: a brief overview. *Journal of inorganic biochemistry*, 195, 120-129.

TÜRKİYE VE DÜNYADA
GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

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