

Aralık 2025



GIDA MÜHENDİSLİĞİ

Alanında Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar

EDİTÖR **DOÇ. DR. MENEKŞE BULUT**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Ankara 2025

ISBN • 978-625-8559-68-2

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

Gıda Mühendisliği Alanında Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar

Editör **Doç. Dr. Menekşe Bulut**

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

KATI-KATI FAZ DEĞİŞİMİ İLE GİZLİ ISI DEPOLAYAN BAZI POLİMER MALZEMELER	1
--	---

Tuğba GÜNGÖR ERTUĞRAL

BÖLÜM 2

GIDA ENDÜSTRİSİNDE DERİN ÖĞRENME UYGULAMALARI VE GIDA GÜVENLİĞİNDE YAPAY ZEKÂ TABANLI YAKLAŞIMLAR.....	15
--	----

Duygu BALPETEK KÜLCÜ

BÖLÜM 3

SU ÜRÜNLERİNDE DESORPSİYON İZOTERMLERİ VE KURUTMA KİNETİKLERİ	29
---	----

Emre KABİL

BÖLÜM 4

GIDALARA UYGULANAN ISIL UYGULAMALAR VE SOUS VİDE TEKİNİĞİ.....	53
--	----

Sabire YERLİKAYA

BÖLÜM 5

MELATONİNİN İNSAN, HAYVAN VE BİTKİ METABOLİZMASI ÜZERİNDEKİ BİYOLOJİK VE FİZYOLOJİK ETKİLERİ	73
--	----

Arzu KAVAZ YÜKSEL

Hülya ÖZTÜRK DOĞAN

Neslihan ÇELEBİ

BÖLÜM 6

MİKROBESİNLERİN (SELENYUM, MAGNEZYUM, ÇİNKO)
HASHİMOTO TİROİDİTİ PATOGENEZİNDEKİ ROLÜ 105

Tuğçe YÜLECİ KURTCU, Tuğba DEMİRİZ YÜCER

BÖLÜM 7

SÜT TEKNOLOJİSİNDE TEMİZ ETİKET YAKLAŞIMI 119

Pınar UZUN

BÖLÜM 8

İĞDE (ELAEAGNUS ANGUSTİFOLIA L.): FİTOKİMYASAL BİLEŞİM,
BİYOLOJİK AKTİVİTELER VE GIDA-ÇEVRE UYGULAMALARI..... 131

Şelale Öncü Glaue

BÖLÜM 9

BEŞİNCİ TAT UMAMI: BİLİMSEL TEMELLER, KİMYASAL
BİLEŞENLER VE ANALİZ YÖNTEMLERİ 155

Serpil YALIM KAYA

Eyyüp ALTUN

BÖLÜM 10

GIDALARDA MİKOTOKSİNLERİN BİRLİKTE BULUNMASI VE
MARUZİYET RİSKİ..... 181

Cavdan DEMİR GÖKİŞİK

BÖLÜM 11

SÜRDÜRÜLEBİLİR L SÜT ÜRÜNLERİ YAKLAŞIMI: HİBRİT
YOĞURTLAR 199

Senem TÜFEKÇİ

BÖLÜM 12

AKUATİK EKOSİSTEMLERDE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: GIDA
GÜVENLİĞİ TEHDİTLERİ, ETKİLERİ VE STRATEJİLER 219

Seda OĞUR

BÖLÜM 13

GIDA AMBALAJ MATERYALİ OLARAK NANOLİF ÜRETİMİ İÇİN
ÇÖZELTİ ÜFLEMELİ EĞİRME SİSTEMLERİ VE ALTERNATİF
CİHAZLAR 255

Tuğba Güngör Ertuğral

BÖLÜM 14

GIDALARDA RAF ÖMRÜNÜ UZATMAYA YÖNELİK ALTERNATİF
KORUMA TEKNOLOJİLERİ 271

Sabire YERLİKAYA

BÖLÜM 15

SİSTEİN: KAYNAKLARI, ENDÜSTRİDE KULLANIMI VE ÜRETİMİ 291

Emine AKSAN ALDANMAZ

Fatma Nuray Şimşek

BÖLÜM 16

ET TEKNOLOJİSİNDE MİKROENKAPSÜLASYON TEKNİKLERİ 307

Nursel SÖYLEMEZ MİLLİ



KATI-KATI FAZ DEĞİŞİMİ İLE GİZLİ ISI DEPOLAYAN BAZI POLİMER MALZEMELER

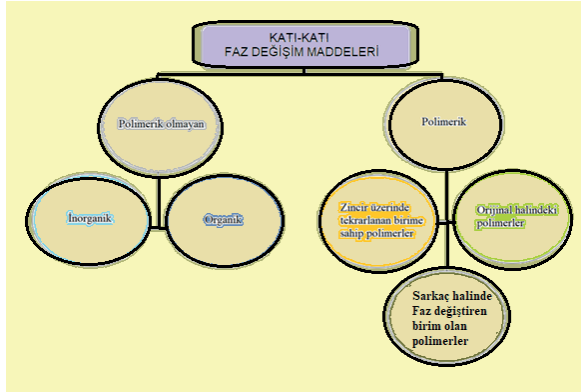
“*Tuğba GÜNGÖR ERTUĞRAL¹*”

¹ Doç.Dr., Çanakkale Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye. Orcid :0000-0002-1306-3399, tugbagungor@comu.edu.tr

Katı-Katı Faz Değişimi

Katı-katı faz değişimi katı-katı faz değişim maddesi (KKFDM) ile gerçekleşir. Katı-katı faz değişimi ısı depolama ve salma sürecinde maddenin kristal yapıdan başka bir kristal yapıya dönüşür (Pillai ve Brinkworth, 1976). KKFDM'ler sızdırma yapmaz ve katı-katı faz değişiminde daha çok organik materyaller tercih edilir (Michaels, 1981). Katı-katı faz değişim malzemeleri, akıllı malzeme ve enerji verimliliği alanlarında kullanılabilir.

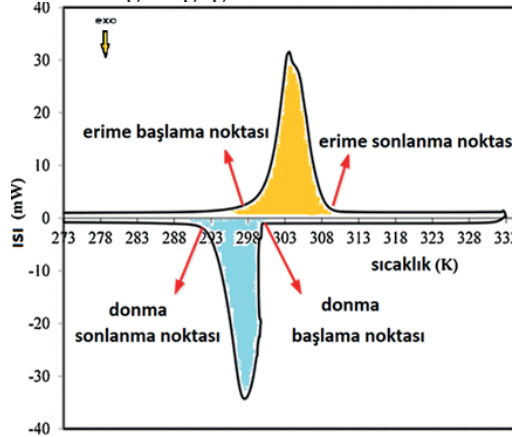
Katı- katı faz değişim maddeleri molekül yapılarına göre sınıflandırılmak istendiğinde (Şekil 1)'de 2 farklı sınıfta incelendiği söylenebilir.



Şekil 1. Katı- katı faz değişim maddelerinin sınıflandırılması (Alkan, 2010).

Gizli ısı depolama ısı depolama sistemleri arasında son yıllarda en çok tercih edilen yöntemler arasındadır ve özellikle akıllı malzeme sentezi ve karakterizasyonu çalışmalarında bu konuya yer verilmiştir.

Katı-katı faz değişimi genelde DSC analizi ile ölçülür. Bu analizde malzemenin katılaşma ve erime sıcaklık ve entalpi değerleri ölçülebilmektedir. Şekil 2'de n-Oktadekan için bir DSC cihazının grafiği görülmektedir.



Şekil 2. FDM (n-Oktadekan) için erime ve donma süreçlerini gösteren DSC eğrileri (Kumarasamy vd., 2016).

Katı-Katı Faz Değişimi ile gizli ısı depolama malzemeleri farklı yöntemlerle hazırlanmaktadır. Bu yöntemler sentez ya da blend karışımlar şeklinde olabilir. Bu üretimlerin bazıları şöyledir;

1. Güneşten gelen ısıyı depolamak için Katı-Katı Faz Değişim Malzemesi Olarak Polietilen Glikol Bazlı Poliüretanın Tek Adımlı ve Çözücü İçermeyen Sentezi

2. Dinamik İç Katalizli Esterifikasyon ve Dikey Yönlendirilmiş İletken Yol Aracılığıyla Yüksek Gizli Isı ve Ultra Yüksek Isı İletkenliğine Sahip Geri Dönüştürülebilir Katı-Katı Faz Değişim Polimer Bazlı Kompozitlerin hazırlanması

3. Termal enerji depolama için ince çelik lifleri ve faz değişim malzemelerini birleştiren yeni bir sülfoalüminat çimento bazlı kompozitin geliştirilmesi

4. Verimli fototermal dönüşüm ve termal enerji depolama için son derece esnek GO–poliüretan katı–katı faz değişim kompozit malzemeleri

5. Kristal yapı düzenlemesi yoluyla esnek polietilen glikol bazlı faz değişim malzemelerinin tasarımı

6. Isı enerjisi depolama ve ısı yönetimi için, polietilen glikol bazlı, doğal olarak antistatik katı-katı faz değişim malzemesi

7. Güneş enerjisi dönüşümü ve depolaması için katı-katı faz değişim malzemeleri olarak poliüretan aşılınmış indirgenmiş grafen oksidin üretimi ve karakterizasyonu

8. Katı-katı faz değişim malzemelerinin termofiziksel özelliklerinin geliştirilmesi ve uygulamalarındaki son gelişmeler: Bir inceleme.

9. Polimer Bazlı Termal Yönetim Malzemesinin Tasarımı ve Hazırlanmasındaki Son Gelişmeler

10. Nanokompozit şekil stabilizasyonlu faz değişim malzemeleri kullanılarak esnek yenilikçi esnek termal depolama tekstili

11. Gıda ambalaj malzemesi olarak kullanılmak üzere ısıya dayanıklı PET–PEG çok bloklu kopolimerlerin sentezi

12. Termal enerji depolama uygulamaları için polimer destekli şekil sabitleyici faz değişim malzemelerinin eleştirel bir incelemesi

13. Termal Enerji Depolama için Yüksek Isı İletkenliğine Sahip Epoksi-Parafin Faz Değişim Malzemesinin Sentezi ve Karakterizasyonu

14. Yaz modunda yeşil tahıl depolaması için faz değişimli enerji yığını üzerine deneysel çalışma

Bu çalışmalar, KKFDMLerin üretimine ışık tutmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde malzemelerin karakterizasyon analizlerinin de yapılması termal özellikleri desteklemiştir. Yapılan bu analizler malzemelerin uygulanabilirliğini desteklemektedir. Bu malzemeler gıda muhafazası için de kullanılabilen malzemelerdir. Soğukta ve sıcakta koruma tekstil, ilaç, gıda, lojistik sektörlerini yakından ilgilendiren konular arasındadır. Faz değişimi ile gizli ısı depolama teknolojisi akıllı materyal geliştirmeye olanak sağlamaktadır.

Sözkonusu çalışmalar ve termal veriler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

1. Güneşten gelen ısıyı depolamak için Katı-Katı Faz Değişim Malzemesi Olarak Polietilen Glikol Bazlı Poliüretanın Tek Adımlı ve Çözücü İçermeyen Sentezi

Güneş sürekli ısı ve ışık yayan bir gezegen olarak bilinmektedir. Yayılan bu ısı farklı depolama yöntemleriyle depolansa da gizli ısı ile depolama yöntemi daha verimli kullanım alanları doğurmaktadır. Gizli ısı depolamada kullanılan FDM amaçlı malteryalardan biri de Poli(etilen glikol) (PEG)'dir.

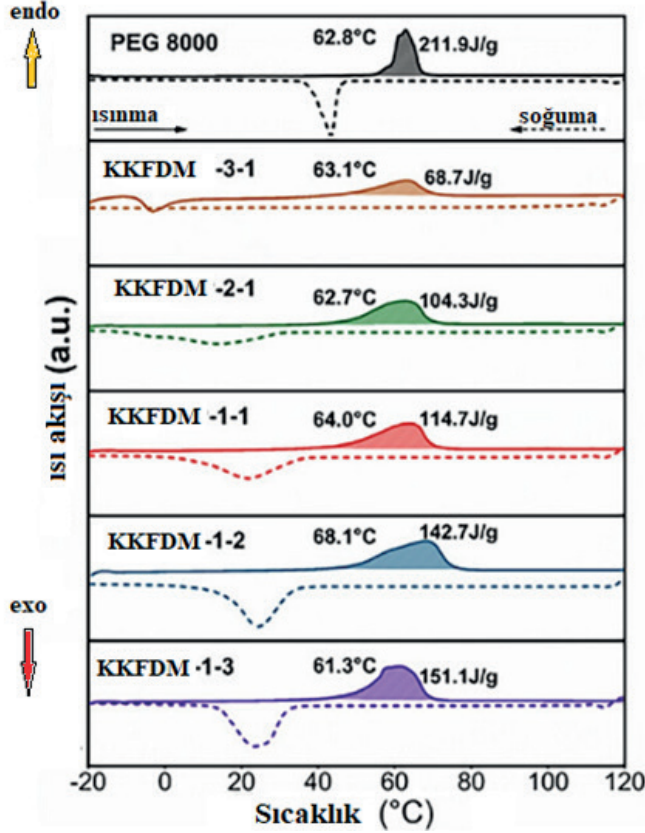
Burada gizli ısı depolamada örnek olarak, PEG temelli katı-katı faz değiştiren malzemeler, PEG ve hexamethylene diisocyanate trimer ile tek seferde çözücüsüz ortamda sentezlendiğinde elde edilen KKFDMLerin ki bunların sızıntı göstermemesi gerekir. 80°C'de sızıntı göstermediği görülmüştür. Çalışmada PEG'in erime noktasının üzerinde olan bu sıcaklıkta üretilen KKFDMLerin faz değişim sıcaklığı 65°C, maksimum gizli ısı 136.8 J/g'dır. Isıl döngü analizi sonuçları ise 200 ısıl döngü sonrasında malzemenin gizli ısıda kayda değer bir değişim ile iyi bir ısıl kararlılık sergileyerek tekrar kullanılabilirlik imkanını göstermiştir (Lu vd., 2019).

Tüm bu sonuçlar, sentezlenen KKFDMLerin güneş ısı enerji depolama uygulamalarında doğrudan güneş ışığı absorplayici olarak büyük potansiyele sahip olduğunu ortaya koyar. Malzemenin termal enerji depolama uygulamaları için yüksek performanslıdır (Lu vd., 2019).

2. Dinamik İç Katalizli Esterifikasyon ve Dikey Yönlendirilmiş İletken Yol Aracılığıyla Yüksek Gizli Isı ve Ultra Yüksek Isı İletkenliğine Sahip Geri Dönüştürülebilir Katı-Katı Faz Değişim Polimer Bazlı Kompozitlerin hazırlanması

Günümüzde elektronik cihazların iç tasarımı entegre ve minyatürleştirilmiş şekildedir. Bu durumdan kaynaklı hızlı ısı dağılımı önemli hale gelmiştir. Yüksek gizli ısıya hem de yüksek termal iletkenliğe sahip kompozitlere acil bir ihtiyaç vardır. Yüksek gizli ısıya ve ultra yüksek iletken kompozit özellikli katı-katı faz değişim malzemeleri üretmek için basit ve verimli bir stratejilerden biri de stiren-maleik anhidrit kopolimeri ve polietilen glikol (PEG) arasında dahili katalizli esterifikasyon ile sentezlenir ve daha sonra kompozitin dikey yönlendirilmiş karbon fiberlere(dizi) doldurulmasıyla elde edilir (Zhang vd., 2025).

Elde edilen kompozitler, $128,12 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ gibi ultra yüksek bir termal iletkenliğe ve $116,3 \text{ J g}^{-1}$ gibi yüksek bir faz geçiş entalpisine sahiptir (Şekil 3). $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yeniden işlenerek orijinal durumuna ve özelliklerine geri döndürülebilmektedir. Kompozitler güneş enerjisi depolamasında iyi bir uygulama alanına sahiptir (Zhang vd., 2025).



Şekil 3. PEG ve KKFDm1-3 DSC eğrisi (Zhang vd., 2025).

3. Termal enerji depolama için ince çelik lifleri ve faz değişim malzemelerini birleştiren yeni bir sülfoalüminat çimento bazlı kompozitin geliştirilmesi

Bazı akıllı kompozit yapılar yani gizli ısı depolama özelliğinde bu tür materyaller mekanik dayanım ve termal enerji depolama/salınım verimliliği için önemli çalışmaları doğurmuştur. Bunlardan biri de, sülfoalüminat çimento harcına ince çelik lifler ve grafit modifiye edilmiş şekil stabilize faz değişim malzemeleri eklenmesiyle elde edilen kompozitlerdir. Burada parafin, düşük yoğunluklu polietilen ve pul grafit ısıtılıp karıştırılarak bir KKFDm özellikli kompozit yapı elde edilir. Özellikle ince çelik lifler, mekanik dayanımı ve termal iletkenliği iyileştirmek için sülfoalüminat çimento bazlı termal enerji depolama kompozitini güçlendirmede kullanılır. Bu kompozitin termofiziksel ve mikro

yapısı ile çelik lif takviyeli sülföalüminat çimento bazlı termal enerji depolama kompozitinin termal ve mekanik özellikleri incelenir. %50 Parafin çok seviyeli uzay ağı yapısına sahip kompozite etkili bir şekilde kapsüllenebileceğini göstermiştir. Ayrıca, çelik lif sülföalüminat çimento bazlı termal enerji depolama kompozitinin mekanik ve termal özelliklerini artırmıştır (Sang vd., 2019).

Karışıma %30 FDM ilavesiyle basınç dayanımının %58.4 oranında düşürmüştür. Çimento harcının ısı iletkenlik katsayısının FDM katı fazda iken %39.9, sıvı fazda ise %40.1 oranında düşmüştür. FDM ilavesi matrisin ısı transfer kapasitesinde önemli bir azalmaya yol açmıştır (Sang vd., 2019).

4. Verimli fototermal dönüşüm ve termal enerji depolama için son derece esnek GO–poliüretan katı–katı faz değişim kompozit malzemeleri

Ayrıca, güneş enerjisinin verimli bir şekilde dönüştürülmesi, depolanması ve salınması potansiyelini artırmak için bir sisteme grafen oksit eklendiğinde güneş termal depolama verimliliği %92'ye ulaşabilir. Katı–katı faz değişim malzemeleri (KKFDM'ler), verimli ısı depolama ve boşaltma yetenekleri nedeniyle termal enerji depolama için umut vadeden bir malzemedir. Kararlı entalpi ve malzeme çok yönlülüğünün elde edilmesi, KKFDM'lerin geliştirilmesinde önemli bir zorluklardandır. Verimli fototermal dönüşüm ve termal enerji depolama için son derece esnek grafen oksit–poliüretan katı–katı faz değişim kompozit malzemeleri üretme konusunda özellikle polimerler, çapraz bağlamayı ve moleküller arası hidrojen bağınyı kolaylaştırmak için trietanolamine dayanarak, malzeme içinde güçlü bir çapraz bağlama ağı oluşturabilir. Bu yaklaşım, KKFDM'nin yüksek faz geçiş entalpisi ($101,2 \text{ J g}^{-1}$), mükemmel esneklik, üstün çekme dayanımı ($\sim 35,96 \text{ MPa}$) ve dikkat çekici çekme gerinimi ($\sim 1275,4\%$) sergilemesini sağlar. Ek olarak, malzemeler, çapraz bağlama ağı nedeniyle çok iyi şekil kararlılığı, şekil hafızası ve kendi kendini onarma özellikleri gösterir. Burada üretilen KKFDM'ler yüksek faz geçiş entalpisi ($\sim 101,2 \text{ J g}^{-1}$), mekanik esneklik, üstün çekme dayanımı ($\sim 35,96 \text{ MPa}$) ve çekme uzaması ($\sim 1275,4 \%$) gösterir (Liv d., 2025).

5. Kristal yapı düzenlemesi yoluyla esnek polietilen glikol bazlı faz değişim malzemelerinin tasarımı

Polietilen glikol (PEG) içeren esnek faz değiştirme malzemelerinin (FFDM) tasarımı, yüksek kristal yapısı nedeniyle yüksek termal enerji depolama kapasitesi sağlarken mekanik dayanıklılığı düşürdüğü için büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir. Burada, PEG bazlı FFDM ağlarına kovalent bağlar şeklinde kristal yapı düzenleyicileri (CSR'ler) eklenerek FFDM'lerin hazırlanma stratejisi geliştirilmiştir. Hidrokinon CSR, kullanılan diğer üç CSR'ye kıyasla FFDM'ler üzerinde en güçlü kristal yapı düzenleme yeteneğine sahiptir (Zhao vd., 2024).

FFDM'ler, kullanılan PEG'lerin sayısal ortalama moleküler ağırlığına ($M_n = 4000 \text{ Da}$, 6000 Da) ve CSR'lerin içeriğine ve türüne bağlı olarak ayarlanabilir faz değişim sıcaklıklarına ($-2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ – $49,7 \text{ }^\circ\text{C}$) ve entalpilerine ($40,7 \text{ J}$

g^{-1} ila $109,3 \text{ J g}^{-1}$) sahipti; bu da ayarlanabilir mekanik gerilime (0,59–15,61 MPa) ve gerinime (%5,74–%505,86) olanak sağladı. Saf PEG’lerle karşılaştırıldığında, FFDM’ler mükemmel şekil kararlılığı, termal kararlılık ve termal güvenilirlik gösterdi. Esneklik ve faz değişim özellikleri, FFDM’lere mükemmel kendi kendine ayarlanabilirlik ve şekil hafıza fonksiyonu kazandırdı. FFDM’lere yönelik yenilikçi strateji, bireysel giyilebilir sıcaklık kontrollü cihazlarda uygulama potansiyelini vurgulamaktadır (Zhao vd., 2024).

Hidroksil içeren PEG’ler ile difenol CSR ve Tri-HDI gibi izosiyanat içeren kürlleme ajanı arasındaki çapraz bağlama reaksiyonları yoluyla PEG bazlı kovalent çapraz bağlı FFDM ağı üretilmiştir. PEG segmentleri faz değişim bileşenleri olarak işlev görürken, difenol CSR’ler kristalleşme yeteneğini düzenlemede ve mekanik özellikleri ayarlama hayati bir rol oynar. FFDM’ler $-2,0$ ila $49,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında ayarlanabilir faz değişim sıcaklıkları sergilerken, erime gizli ısı da ayarlanabilir (Zhao vd., 2024).

6. Isı enerjisi depolama ve ısı yönetimi için, polietilen glikol bazlı, doğal olarak antistatik özelliğe sahip katı-katı faz değişim malzemesi

Polietilen glikol (PEG), önemli ve popüler bir faz değişim malzemesidir (FDM), ancak iyi bir antistatik malzeme değildir; bu da elektrikli cihazların termal enerji depolaması ve termal yönetimi için kullanıldığında statik elektrik birikimine ve elektrostatik deşarjlara neden olur. Burada, makromoleküller zincirlere iyonik bir sıvı ekleyerek iyi antistatik özelliğe sahip bir PEG bazlı katı-katı FDM (KKFDM)’dir. Bu KKFDM, 90°C ’de bile katı haldedir ve saf PEG’in sızıntı sorununu ortadan kaldırır. Erime ve katılaşma süreçlerindeki gizli ısı değerleri sırasıyla $56,2$ ve $30,6 \text{ J g}^{-1}$ ’dir. Ek olarak, bu KKFDM, termogravimetrik ve termal döngü testlerine göre termal depolama ve termal yönetim için iyi termal kararlılığa ve termal güvenilirliğe sahiptir. KKFDM’nin ortam sıcaklığındaki hacim ve yüzey özdirençleri sırasıyla $108,87 \text{ } \Omega\cdot\text{m}$ ve $108,92 \text{ } \Omega$ olup, iyi bir antistatik performans sergilemektedir (Wu vd., 2024).

Bu çalışmada PEG bazlı antistatik özellikli KKFDM sentezlenmiş; yöntem olarak iyonik sıvı ile modifikasyon polimerizasyon tekniği kullanılmıştır. Materyal $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye kadar katı kalabilen, sızıntı riskini ortadan kaldıran bir yapıya sahiptir. Rapora göre, latent ısı (erime): $56,2 \text{ J/g}$; katılaşma: $30,6 \text{ J/g}$ olarak ölçüm sağlanmıştır (Wu vd., 2024).

7. Güneş enerjisi dönüşümü ve depolaması için katı-katı faz değişim malzemesi olarak poliüretanla aşılınmış indirgenmiş grafen oksidin üretimi ve karakterizasyonu

Polietilen glikol (PEG), 4,4-difenilmetan diizosiyanat (MDI) ve indirgenmiş grafen oksitten (rGO) oluşan, yeni bir katı-katı faz değişim malzemesi (KKFDM), yani poliüretan aşılınmış indirgenmiş grafen oksit (rGO-PU), yerinde polimerizasyon, esterifikasyon ve indirgeme reaksiyonu ile üretilmiştir. rGO-PU KKFDM’lerin başarılı sentezi ve kimyasal yapısı çeşitli spekt-

roskopi ve mikroskopi teknikleriyle doğrulanmıştır. rGO-PU KKFDm'lerin termal özelliklerini incelemek için bir dizi karakterizasyon kullanılmıştır. rGO-PU KKFDm'nin termal iletkenliği rGO ile önemli ölçüde iyileştirilmiş olup, rGO-PU KKFDm'nin en yüksek termal iletkenliği 0,696 W/m·K'ye ulaşarak PU'dan %131,2 daha yüksek olmuştur. rGO-PU KKFDm'lerin aşırı soğuması PEG ve PU'dan daha düşüktür; rGO-PU KKFDm'nin en yüksek erime ve kristalleşme gizli ısıları sırasıyla 138,7 J/g ve 130,9 J/g'dir. rGO-PU KKFDm'nin bozunma sıcaklığı, PEG ve PU'ya göre sırasıyla yaklaşık 4 °C ve 24 °C daha yüksektir, bu da iyi bir termal kararlılığa sahip olduğunu gösterir. rGO-PU KKFDm, iyi şekil kararlılığı, mükemmel termal güvenilirlik ve yapısal kararlılık sergiler. Ayrıca, rGO-PU KKFDm'nin ışıık-ısı dönüşüm verimliliği %81,8'e ulaşabilir. Bu nedenle, sentezlenen rGO-PU KKFDm'ler, güneş enerjisi kolektör sistemi gibi ışıık-ısı enerjisi depolama uygulamaları için önemli bir potansiyele sahiptir (Mu vd., 2019).

Bu çalışmada, güneş enerjisi toplama sisteminde güneş radyasyonunun etkin kullanımını sağlamak amacıyla rGO-PU KKFDm'ler hazırlanmıştır. rGO-PU KKFDm'ler, yerinde polimerizasyon, esterifikasyon ve indirgeme reaksiyonu yoluyla üretilmiştir. rGO-PU KKFDm'lerin özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. PU'nun termal iletkenliği rGO ile önemli ölçüde iyileştirilmiş olup, rGO-PU KKFDm'nin en yüksek termal iletkenliği PU KKFDm'ye göre %131,2 daha yüksektir (Mu vd., 2019).

8. Katı-katı faz değişim malzemelerinin termofiziksel özelliklerinin geliştirilmesi ve uygulamalarındaki son gelişmeler: Bir inceleme.

Faz değiştirme malzemeleri (FDM), termal enerji depolama uygulamalarında potansiyel bir role sahiptir. Son gelişmeler, düşük aşırı soğuma, katı-katı faz geçişi nedeniyle sınırlı hacim genişlemesi, yüksek termal kararlılık ve ayrıca önemli gizli ısı ve termal iletkenlik değerleri gibi benzersiz avantajlara sahip katı-katı faz değiştirme malzemeleri (KKFDm) üzerinde önemli çalışmalar göstermiştir. Bu inceleme, katı-katı faz geçiş mekanizmaları, özellikleri, termofiziksel özellik iyileştirmesi ve belirli enerji depolama uygulamaları için deneysel vaka çalışmaları odaklı olarak KKFDm üzerine yapılan güncel araştırmaları ele almaktadır. Faz geçiş sıcaklığı ve gizli ısı açısından farklı KKFDm sınıflandırmaları için katı-katı faz geçiş mekanizması ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu inceleme ayrıca, KKFDm'nin temel özellikleri, özellik iyileştirme yöntemleri, SS-FDM'nin ikili/üçlü karışımları ve faz geçiş sıcaklığını değiştirmeye ve termal iletkenliği artırmaya olanak tanıyan hibrit KKFDm'ler hakkında ayrıntılı bilgiler içermektedir. Son olarak, geliştirilmiş KKFDm'nin potansiyel kullanım alanları detaylı olarak ele alınarak, araştırmacılara farklı enerji depolama uygulamaları için KKFDm'nin seçimi, özelleştirilmesi, gelecekteki kullanım alanları ve araştırma eksikliklerinin giderilmesi konusunda yol gösterilmiştir (Raj vd., 2020).

Yapılan araştırmada KKFDm'lerin termal enerji depolamada yüksek potansiyele sahip olduğunu, moleküler yapının ve katkı maddelerinin optimize edilmesiyle gizli ısı depolama kapasitesi ve iletkenliğin artırılabilirliğini, ayrıca mevcut sınırlamaların yeni sentez ve katkı stratejileriyle aşılabileceğini göstermektedir (Raj vd., 2020).

9. Polimer Bazlı Isı Yönetim Malzemelerinin Tasarımı ve Hazırlanmasındaki Son Gelişmeler

Tüketici elektroniği ve 5G teknolojisindeki artış, elektronik cihazların güç yoğunluğunun sürekli artmasına ve kaçınılmaz aşırı ısınma sorunlarına yol açarak, elektronik cihazların çalışma verimliliğini düşürmekte ve kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle, yüksek ısı dağıtım performansı gereksinimini karşılayacak yenilikçi malzemeler keşfetmek birincil görev ve ön koşuldur. Geleneksel termal yönetim malzemelerine (örneğin seramik ve metaller) kıyasla, polimer bazlı termal yönetim malzemeleri mükemmel mekanik, elektriksel yalıtım, kimyasal direnç ve işleme özelliklerine sahiptir ve bu nedenle ısı dağıtım sorununu çözmek için en umut vadeden aday olarak kabul edilmektedir. Bu derlemede, termal iletimli termal yönetim malzemesi ve termal depolamalı termal yönetim malzemesi olmak üzere iki tipik polimer bazlı termal yönetim malzemesinin son gelişmelerini özetledik. Ayrıca, iki polimer bazlı termal yönetim malzemesinin yapısal tasarımı, işleme stratejileri ve tipik uygulamaları ele alındı. Son olarak, polimer bazlı termal yönetim malzemesinin zorluklarını ve gelecek beklentilerini ortaya koyduk. Bu çalışma, gelişmiş işleme yaklaşımları geliştirmek ve yüksek performanslı polimer bazlı termal yönetim malzemesi oluşturmak için yeni bakış açıları sunmaktadır (Zhang vd., 2021).

FDM'nin faz değiştirme entalpisinin 131 J g^{-1} kadar yüksek olduğunu ve bunun da iyi termal güvenilirlik ve şekil kararlılığı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ek olarak, kimyasal aşılama yöntemiyle yeni katı-katı FDM sentezlendi ve FDM, yüksek erime noktalı malzemeye aşılandı. Cao ve ark. Radikal polimerizasyon yoluyla heksadesil akrilat (HDA) ve GO levhalarına dayalı yeni bir katı-katı FDM üretti; burada HAD, GO levhalarına kovalent bağ ile aşılandı. Kompozit FDM, 80°C sıcaklıkta inanılmaz bir şekil kararlılığına ve sızıntı olmamasına sahiptir (Zhang vd., 2021).

10. Nanokompozit şekil stabilizasyonlu faz değişim malzemeleri kullanılarak esnek yenilikçi esnek termal depolama tekstili

Bu makalede, dokunmamış polyester (PET) alt tabaka üzerine yerleştirilmiş organik faz değişim malzemelerine (FDM) dayalı yeni bir esnek termal depolama sistemi açıklanmaktadır. Polietilen glikolün (PEG) karbon nanofiberlere (CNF) kapsüllenmesi yoluyla termal düzenleyici etkiler oluşturulmuş ve şekil-kararlı bir faz değişim malzemesi üretilmiştir. Sistemin termal iletkenliğinde (TC) iyileşme, indirgenmiş grafit oksit nanopartiküllerinin (rGONP) CNF'lere dahil edilmesiyle elde edilmiştir. Üretilen KKFDM'lerin lifli alt tabakaya yüklenmesi ve sabitlenmesi için yeni bir yöntem uygulanmış ve kabul edilebilir bir esneklik seviyesi korunmuştur (bükülme uzunluğundaki değişim $\%30$ 'dan az). Örnek performansı, termal özellikleri ölçülerek değerlendirilmiştir. Örneklerin fiziksel özellikleri, yı-kama haslığı, aşınma direnci, morfolojisi ve FDM sızıntısı da değerlendirilmiştir. Sonuçlar, örneklerin karakteristik faz değişim sıcaklık aralıkları sırasıyla erime ve donma için $30,1\text{--}31,4^\circ\text{C}$ ve $19,2\text{--}24,3^\circ\text{C}$ olan iyi bir termal depolama yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca erime için $8,9\text{--}22,9 \text{ J g}^{-1}$ ve donma için

11,2–21,4 J g⁻¹ gizli ısı değerlerine sahiptir. PEG için CNF-rGONP kullanımı, sistemin termal kapasitesini %454 oranında artırarak hızlı bir termal tepki sağlamış ve PEG sızıntısını etkili bir şekilde önlemiştir. Son olarak, dokumasız alt tabakaya yükleme ve sabitleme yöntemi, yıkama ve aşınma testleri sırasında %4'ten daha az ağırlık kaybıyla kabul edilebilir bir dayanıklılık seviyesi sağlamıştır. Bu sistem, hızlı tepki veren, esnek termal depolama özellikli giyilebilir cihazlar için umut vadeden bir çözüm sunmaktadır (Zeighampour vd., 2023).

Bu çalışmada, PEG'in düşük termal iletkenlik ve sızıntı problemlerini aşmak amacıyla CNF-rGONP (50:50 ağırlıkça) destekli, şekil kararlı ve termal olarak duyarlı bir KKFDMD geliştirilmiştir. Elde edilen KKFDMD kaplı dokusuz kumaş; uygun faz geçiş sıcaklığı, yeterli enerji depolama kapasitesi, yüksek termal dayanıklılık ve 75 °C'de 72 saat boyunca sızıntı göstermeyen üstün şekil kararlılığı sergilemiştir. Literatürde raporlanan benzer KKFDMD sistemlerine kıyasla dört katından fazla artan termal iletkenlik değeri, malzemenin öne çıkan avantajlarından biridir (Zeighampour vd., 2023).

Vinil asetat akrilik reçine kullanılarak geliştirilen ölçeklenebilir kaplama yöntemi, termal özellikleri korurken kabul edilebilir mekanik esneklik, yıkama ve aşınma dayanıklılığı sağlamıştır. Bu sonuçlar, geliştirilen PEG/CNF-rGONP esaslı KKFDMD kumaşın termoregülasyon, enerji depolama ve dinamik yalıtım uygulamaları için güçlü bir aday olduğunu göstermektedir (Zeighampour vd., 2023).

11. Gıda ambalaj malzemesi olarak kullanılmak üzere ısıya dayanıklı PET-PEG çok bloklu kopolimerlerin sentezi

Gıdaların raf ömrünün kısa olması nedeniyle kalitesini etkileyen depolama koşullarından biri de sıcaklıktır. Isı yalıtımı, ambalaj malzemelerine faz değişim malzemeleri (FDM'ler) eklenerek sağlanabilir. FDM'ler, sırasıyla erime ve kristalleşme işlemleri sırasında faz değişiminin gizli ısını depolar ve serbest bırakır. Bu nedenle, paketlenmiş gıdalar için termal koruma sağlayabilirler. Bu çalışmanın amacı, termal enerji depolama özelliğine sahip potansiyel gıda ambalaj malzemeleri olarak yeni poli(etilen tereftalat)-poli(etilen glikol) (PET-PEG) çok bloklu kopolimerleri katı-katı faz değişim malzemeleri olarak hazırlamaktır (Güngör Ertuğral ve Alkan, 2021).

Polyesterleştirme, farklı ortalama moleküler ağırlıklarda (1000, 4000 ve 10000 g/mol) PEG, etilen glikol ve tereftaloil klorür ile gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen PET-PEG çok bloklu kopolimerleri, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi ve diferansiyel tarama kalorimetrisi yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. PET-PEG çok bloklu kopolimerlerin kristal yapıları polarize optik mikroskopi ile karakterize edilmiş ve yüzey özellikleri temas açısı testleri yapılarak belirlenmiştir. PET-PEG çok bloklu kopolimerlerin termal koruma kapasitesi 26,1–150,5 J/g aralığında bulunmuştur. Sonuç olarak, bu çalışma, ambalajlı gıda maddelerinin kalitesini korumak için ambalaj malzemesi uygulamalarında etkili termal koruma için uygun PET-PEG çok bloklu kopolimerlerin potansiyelini göstermektedir (Güngör Ertuğral ve Alkan, 2021).

12. Termal enerji depolama uygulamaları için polimer destekli şekil sabitleyici faz değişim malzemelerinin eleştirel bir incelemesi

Faz değiştirme malzemeleri (FDM'ler), faz dönüşümü sırasında termal enerjiyi depolama ve serbest bırakma yetenekleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bununla birlikte, geleneksel FDM'ler sınırlı termal iletkenlik, katıdan sıvıya faz dönüşümü sırasında sızıntı, termal bozulma ve dayanıklılık gibi zorluklarla karşı karşıyadır.

Araştırmacılar, bu zorlukların üstesinden gelmek ve termal iletkenliği artırmak için yüksek termal iletkenliğe sahip katkı maddeleri eklemek amacıyla, destekleyici matris olarak polimerler kullanan şekil stabilize edilmiş FDM'ler (KKFDM'ler) oluşturmaya odaklanmıştır. Geleneksel FDM'lere kıyasla, polimer bazlı KKFDM'ler genellikle daha esnek, hafif ve dayanıklıdır ve belirli uygulamalara göre kolayca özelleştirilebilir. Polimer bazlı KKFDM'ler oluşturulurken FDM yüklemesi, termal döngüsellik, maliyet etkinliği ve çevresel kaygılar gibi çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır. Bu derleme makalesi, nispeten yüksek mekanik dayanımları, FDM ile uyumlulukları, mükemmel termal kararlılıkları ve kimyasal dirençleri nedeniyle KKFDM'ler için umut vadeden destekleyici malzemeler olarak poliüretan, poliakrilatlar, poliolefin vb. çeşitli polimerleri kapsamlı bir şekilde incelemiştir (Bidiyasar vd.,2024).

Kitosan, selüloz ve nişasta gibi doğal polimerler de çevre dostu çözümler için değerlendirilmektedir. Araştırmacılara malzeme seçiminde rehberlik etmek amacıyla, bu tür KKFDM'lerin geliştirilmesi sırasında her bir polimerin spesifik özelliklerini, maliyet etkinliğini ve çevresel etkisini de ele aldık. Polimer bazlı KKFDM'lerin güneş enerjisi depolama, tıbbi cihazlar, yapı malzemeleri, elektronik, ulaşım endüstrisi ve atık ısı geri kazanımındaki uygulamaları kısaca tartışılmıştır. Son olarak, bu alanda yeni araştırmacıların dikkatini çekmek için bazı gelecekteki geliştirme alanları ele alınmıştır. Bu incelemede verilen bilgiler, okuyucuların polimer bazlı KKFDM'leri anlamalarına ve çeşitli uygulama yöntemleriyle destek malzemesi olarak istedikleri polimeri seçmelerine yardımcı olacaktır. (Bidiyasar vd.,2024).

13. Termal Enerji Depolama için Yüksek Isı İletkenliğine Sahip Epoksi-Parafin Faz Değişim Malzemesinin Sentezi ve Karakterizasyonu

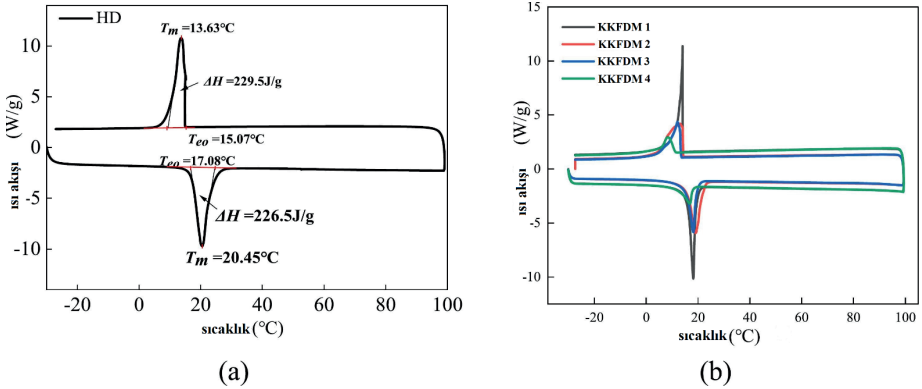
Dünya yüksek enerji kriziyle karşı karşıya ve enerji tasarrufu teknikleri ile yenilenebilir kaynakların kullanımı üzerine araştırmalar devam ediyor. Termal enerji depolama sistemleri (TES) gelişti ve dünyanın farklı bölgelerinde uygulanmaya başlandı. Faz değişim malzemeleri (FDM) TES olarak yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak faz değişim sürecinde sızıntı yapmaları nedeniyle uygulamaları sınırlıdır. Bu sorun, metal, inorganik kaplamalar veya polimerik malzemelerle kaplanarak giderilmektedir. Bu çalışmada, FDM olarak parafin mumu (erime sıcaklığı -50°C) kullanılmış ve epoksi reçine (LY556) ile kaplanmıştır. Saf epoksi çok düşük termal iletkenliğe sahiptir, bu da FDM'nin ısı transfer hızını azaltabilir. Bunu önlemek için, epoksi reçine, yüksek termal iletkenliğe sahip genleştirilmiş grafit dolgu madde-

si eklenerek modifiye edilmiştir. Genleştirilmiş grafitli epoksinin termal iletkenlik çalışması yapılmış ve uygun bir dolgu maddesi konsantrasyonu seçilmiştir. Parafin mumu mikrokürelere dönüştürüldü ve ardından epoksi matris içine yerleştirildi. Kompozitin termal kararlılığı ve faz geçiş davranışı, TGA ve DSC çalışmaları kullanılarak analiz edildi (PK ve Philip, 2023).

14. Yaz modunda yeşil tahıl depolaması için faz değişimli enerji yığını üzerine deneysel çalışma

Mikrobiyolojik ve enzimatik bozulmalara yatkın olan tahılların depolaması ve muhafazası oldukça önemlidir. Tahıllar uygun ortam bulduğunda çimlenme eğilimi gösterebilirler. Bu istenmeyen bir durumdur. n-Heksadekan (HD), yüksek gizli ısı ve 16–24°C'lik faz geçiş sıcaklığı aralığı nedeniyle faz değiştirme malzemesi olarak seçilmiştir; bu sıcaklık, tahıl depolama için gerekli sıcaklık ihtiyacını karşılar (Wang vd.,2025).

Faz değişim alt tabakası olarak n-Heksadekan taşıyıcı malzeme olarak yüksek yoğunluklu polietilen ve termal iletken dolgu maddesi olarak etilen glikol kullanılarak çeşitli karıştırma oranlarıyla yüksek sıcaklıkta eriyik karıştırma yöntemiyle üretilen. KKFDm, ki burada bileşenler kimyasal reaksiyon olarak değil fiziksel olarak bağlanmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan KKFDm'lerin DSC ölçümü yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. DSC test sonuçları (a) n-hegzadekan (HD) ; (b) KKFDm1,2,3,4 (Wang vd.,2025).

DSC diyagramında (Şekil 4a), T_{eo} faz geçişinin başlangıç sıcaklığı, T_m faz geçişinin tepe sıcaklığı ve ΔH faz geçişinin gizli ısıdır. Hem saf HD hem de KKFDm1–KKFDm4 için belirgin endotermik ve ekzotermik tepeler gözlemlendi. HD için faz geçiş tepe sıcaklıkları ısıtma sırasında 20,45 °C ve soğutma sırasında 13,63 °C idi. KKFDm1–4 için ısıtma tepe sıcaklıkları sırasıyla 18,19 °C, 19,02 °C, 18,20 °C ve 16,81 °C iken, karşılık gelen soğutma tepe sıcaklıkları 14,03 °C, 12,93 °C, 13,36 °C ve 8,40 °C idi. KKFDm1–3'ün faz geçiş sıcaklıkları, hem ısıtma hem de soğutma döngülerinde saf HD'ninkine yakın sayılır (Wang vd.,2025).

KAYNAKÇA

- Alkan, C., 2010. Katı-katı faz değişim maddeleri. In IEA ANNEX 4224 Bordeaux Meeting 2010.
- Bidiyasar, R., Kumar, R., & Jakhar, N. (2024). A critical review of polymer support-based shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage applications. *Energy Storage*, 6(4), e639.
- Güngör Ertuğral, T., & Alkan, C. (2021). Synthesis of thermally protective PET-PEG multiblock copolymers as food packaging materials. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9_suppl), S1125-S1133.
- Kumarasamy, K., An, J., Yang, J., & Yang, E. H. (2016). Numerical techniques to model conduction dominant phase change systems: A CFD approach and validation with DSC curve. *Energy and Buildings*, 118, 240-248.
- Li, L., Peng, J., Wang, L., Lai, J., Zhao, C., Xiang, D., ... & Wu, Y. (2025). Highly flexible GO-polyurethane solid-solid phase change composite materials for efficient photothermal conversion and thermal energy storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(4), 3073-3083.
- Lu, X., Fang, C., Sheng, X., Zhang, L., & Qu, J. (2019). One-step and solvent-free synthesis of polyethylene glycol-based polyurethane as solid-solid phase change materials for solar thermal energy storage. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(8), 3024-3032.
- Michaels, A. I. (1981). An overview of the USA Program for the development of thermal energy storage for solar energy applications. In *Thermal Storage of Solar Energy: Proceedings of an International TNO-Symposium Held in Amsterdam, The Netherlands*, 5-6 November 1980 (pp. 79-89). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Mu, B., & Li, M. (2019). Fabrication and characterization of polyurethane-grafted reduced graphene oxide as solid-solid phase change materials for solar energy conversion and storage. *Solar Energy*, 188, 230-238.
- Pillai, K. K., & Brinkworth, B. J. (1976). The storage of low grade thermal energy using phase change materials. *Applied Energy*, 2(3), 205-216.
- PK, R., MS, M., & Philip, M. A. (2023, July). Synthesis and Characterization of High Thermally Conductive Epoxy-Paraffin Phase Change Material for Thermal Energy Storage. In *Proceedings of the 7th Biennial International Conference On Emerging Trends in Engineering, Science & Technology (ICETEST 2023)*.
- Raj, C. R., Suresh, S., Bhavsar, R. R., & Singh, V. K. (2020). Recent developments in thermo-physical property enhancement and applications of solid solid phase change materials: A review. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 139(5).
- Sang, G., Cao, Y., Fan, M., Lu, G., Zhu, Y., Zhao, Q., & Cui, X. (2019). Development of a novel sulphoaluminate cement-based composite combining fine steel fibers and phase change materials for thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 183, 75-85.
- Wang, H., Hu, W., Zeng, C., & Qin, X. (2025). Experimental study on phase change energy

- pile for green grain storage in summer mode. *Journal of Energy Storage*, 132, 117702.
- Wu, S., Zhang, Y., Deng, M., Liang, G., Ju, H., & Xiao, Y. (2024). An intrinsic antistatic polyethylene glycol-based solid–solid phase change material for thermal energy storage and thermal management. *Polymers for Advanced Technologies*, 35(3), e6347.
- Zeighampour, F., Khoddami, A., & Dolez, P. I. (2023). Innovative flexible thermal storage textile using nanocomposite shape-stabilized phase change materials. *Fashion and Textiles*, 10(1), 43.
- Zhang, H., Shi, T., & Ma, A. (2021). Recent advances in design and preparation of polymer-based thermal management material. *Polymers*, 13(16), 2797.
- Zhang, R., Li, Y., Zhou, B., Liu, C., Zhang, Y., Xiao, C., ... & Wong, C. P. (2025). Recyclable Solid-solid Phase Change Polymer-based Composites With High Latent Heat and Ultrahigh Thermal Conductivity via Dynamic Internal-catalyzed Esterification and Vertically Oriented Conductive Pathway. *Small*, 2501959.
- Zhao, Y., Chen, S., Wei, Z., Ding, J., Zhao, S., Liu, Z., ... & Fu, X. (2024). Design of flexible polyethylene glycol-based phase change materials by crystal structure regulation. *Polymer*, 312, 127632.



GIDA ENDÜSTRİSİNDE DERİN ÖĞRENME UYGULAMALARI VE GIDA GÜVENLİĞİNDE YAPAY ZEKÂ TABANLI YAKLAŞIMLAR

“ ”

Duygu BALPETEK KÜLCÜ¹

¹ Doç. Dr., Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, duygu.balpetek@giresun.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7108-2654>

GİRİŞ

Doğal ürünler gıda olarak yaygın biçimde tüketilmekte olup, aynı zamanda tüketici taleplerini karşılamak amacıyla çeşitli işlemlerden geçirilebilmektedir. Gıdaların türü, bileşimi, besin değerleri ve işleme yöntemleri gibi özellikleri sağlıklı beslenme açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, farklı coğrafi bölgelerde yaşayan bireylerin farklı beslenme alışkanlıklarına sahip olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, gıdaların söz konusu özelliklerinin (tür, bileşim, besin değerleri, işleme yöntemleri vb.) anlaşılması, küresel ölçekte tüketiciler için gıda kalitesinin ve güvenliğinin değerlendirilmesinde temel bir gereklilik olarak görülmektedir (Zhou ve ark.,2019).

İnsanlık ile gıda arasındaki etkileşim, tarihsel süreçte sürekli bir değişim ve dönüşüm içerisinde olmuştur. Tarımın erken dönemlerinden itibaren orak ve saban gibi ilkel araçlardan otomatik hasat makinelerine, kurutma ve tuzlama gibi yöntemlerden soğutmalı depolama alanlarına uzanan gelişmeler, insan-gıda etkileşiminin verimlilik artışıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Daha yüksek verimlilik arayışı, yüksek üretim kapasitesi ve tüketime hazır gıda erişimiyle sonuçlanmıştır. Bu bağlamda, günümüzde söz konusu evrimin bir sonraki adımının yapay zeka teknolojileri ve “Centaur” olarak adlandırılan, yapay zeka destekli insan etkileşimlerinin gıda sistemlerine entegre edilmesiyle şekillenmesi mümkün olacaktır (Zhang ve ark., 2023).

Son yıllarda, algoritmik gelişmeler ve artan bilgi işlem kapasitesine dayalı veri işleme yöntemleri önemli bir ilerleme kaydetmiş ve gıdaların özgünlüğünün sağlanmasında kritik bir unsur haline gelmiştir. Yapay zekâ, insan zekâsının düşünme, öğrenme ve karar verme gibi bilişsel süreçlerini taklit etmeyi amaçlayan geniş bir bilim alanıdır. Bu alanın alt dalı olan makine öğrenmesi, bilgisayarların açıkça programlanmadan, verilerden deneyim yoluyla öğrenmesini ve performanslarını sürekli olarak geliştirmesini sağlamaktadır. Makine öğrenmesinin daha ileri bir biçimi olan derin öğrenme ise, insan beyninin sinir ağlarından esinlenilmiş çok katmanlı yapılar kullanarak büyük ve karmaşık veri kümelerinden anlamlı örüntüler çıkarmaktadır. Böylece yapay zekânın genel hedefi olan akıllı davranışı gerçekleştirmek için veriye dayalı, kendini geliştirebilen ve yüksek doğrulukla sonuç üretebilen sistemler ortaya çıkarmaktadır (Özgür,2021). Gıda özgünlüğünün belirlenmesinde farklı derin öğrenme mimarilerinin önemli başarılar gösterdiği bildirilmektedir. Örneğin, çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağına dayalı çok katmanlı algılayıcılar, gıda kalitesi ve özgünlüğünün değerlendirilmesinde etkili sonuçlar ortaya koymuştur. Benzer şekilde, görüntü işleme alanında yaygın biçimde kullanılan evrişimli sinir ağları (CNN); renk, şekil ve doku gibi görsel özellikleri otomatik olarak tanımlayabilmektedir. Ayrıca tekrarlayan sinir ağları, oto kodlayıcılar ve üretken çatışmacı ağlar gibi diğer modellerin de gıdaların özgünlüğünün belirlenmesinde yararlı olduğu tespit edilmiştir.

Teknolojik ilerlemeler devam ettikçe, derin öğrenme yöntemlerinin gıda özgünlüğünün değerlendirilmesinde sunduğu olanakların daha da genişlemesi beklenmektedir. Bu teknikler yalnızca gıda tanımlama süreçlerini daha hızlı ve daha doğru hale getirmekle kalmamakta, aynı zamanda tüketicilere daha güvenilir gıda seçenekleri sunarak gıda endüstrisinde yenilikçi uygulamaların gelişmesine de katkı sağlamaktadır (Deng ve ark., 2024).

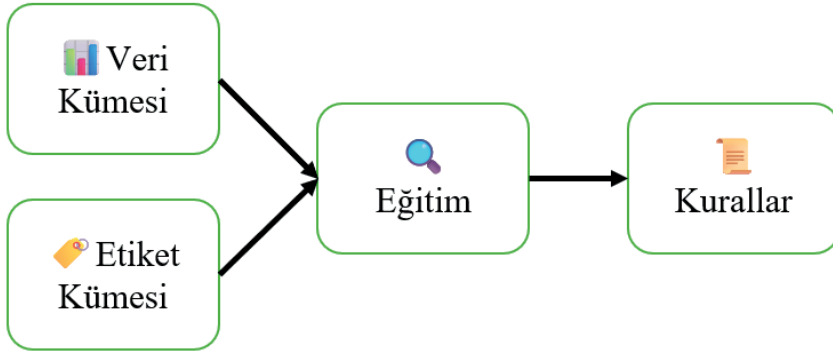
Derin öğrenme yaklaşımlarının ileri görüntüleme teknolojileriyle bütünleştirilmesi, gıda tazeliğinin belirlenmesinde doğruluk düzeyini önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu modeller, karmaşık görsel ve spektral verileri işleyerek gıda kalitesindeki en küçük değişimleri dahi ortaya çıkarabilmekte ve hassasiyet ile güvenilirlik bakımından geleneksel yöntemlerden daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Sensör füzyonu ve çok modlu görüntüleme alanındaki ilerlemeler, gıda tazeliğinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Farklı görüntüleme kaynaklarından elde edilen verilerin entegrasyonu, çeşitli tazelik göstergelerinin eşzamanlı incelenmesine olanak sağlayarak kaliteye bütüncül bir perspektiften yaklaşmayı mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, otomasyon, robotik, nesnelerin interneti (IoT) ve büyük veri analitiği gibi Endüstri 4.0 bileşenlerinin gıda sektöründe benimsenmesi; operasyonel verimliliği artırmakta, gıda güvenliğini güçlendirmekte ve tedarik zinciri yönetimini optimize ederek sektörde dönüşüm yaratmaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, derin öğrenme tabanlı yaklaşımları destekleyerek tazelik tespiti ve kalite güvencesine yönelik akıllı ve otonom sistemlerin geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Alanın mevcut kısıtlarının aşılabilmesi için, yenilikçi görüntüleme yöntemleriyle birleştirilmiş derin öğrenme çözümlerinin sürekli olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecekteki çalışmaların; enerji açısından verimli modellerin tasarlanmasına, uygulamaların işlenmiş gıda ürünlerine genişletilmesine, ayrıca gerçek zamanlı tazelik tespitini güçlendirmek ve gıda güvenliği ile kaliteyi garanti altına almak amacıyla yeni teknolojilerin entegrasyonuna odaklanması beklenmektedir (Singh ve ark., 2025).

Derin Öğrenmenin Temelleri

Derin öğrenme, yapay zeka ve istatistiğin bir alt kümesi olan makine öğreniminin özel bir dalıdır. Yapay zeka araştırmaları, II. Dünya Savaşı'nın hemen sonrasında başlamıştır. Bu ilk çalışmalar, beynin yapısı, önermesel mantık ve Turing'in hesaplama teorisi üzerine inşa edilmiştir. Warren McCulloch ve Walter Pitts, eşik mantığına dayalı sinir ağları için matematiksel bir formülasyon geliştirmiştir. Bu gelişme, sinir ağı araştırmalarını iki ana yaklaşıma ayırmıştır: biri beyindeki biyolojik süreçlere, diğeri ise sinir ağlarının yapay zeka uygulamalarına odaklanmıştır. Araştırmalar, herhangi bir işlevin bir dizi nöron aracılığıyla gerçekleştirilebileceğini ve bir sinir ağının öğrenme kapasitesine sahip olabileceğini göstermiştir. 1948 yılında Norbert Wiener, kontrol, iletişim ve istatistiksel sinyal işleme kavramlarını ele aldı-

ğı *Cybernetics* adlı eserini yayımlamıştır. Sinir ağları alanındaki bir sonraki önemli gelişme, Donald Hebb'in 1949 yılında yayımlanan *The Organization of Behavior* adlı kitabıdır; bu eser, sinaptik bağlantıları beynin öğrenme süreçleriyle ilişkilendirerek öğrenme ve uyarlanabilir sistemler için temel bir kaynak oluşturmuştur. Ardından, Marvin Minsky ve Dean Edmonds, 1950 yılında Harvard Üniversitesi'nde ilk yapay sinir ağı bilgisayarını geliştirmişlerdir (Paluszek ve Thomas, 2020).

Makine öğrenimi, çevresel verilerden öğrenerek insan zekâsını taklit etmeyi amaçlayan gelişen bir hesaplama algoritmaları dalıdır. Derin öğrenme ise, bilgisayarların insan yapımı özelliklere ihtiyaç duymadan doğrudan ham verilerden öğrenmesine olanak tanıyan makine öğreniminin bir alt kategorisidir. Bu algoritmalar, günümüzün büyük veri çağında önemli bir bilgi işlem aracı hâline gelmiştir. Makine ve derin öğrenmeye dayalı yöntemler, örüntü tanıma, bilgisayarlı görü, uzay mühendisliği, finans, eğlence, hesaplamalı biyoloji ve biyomedikal ile tıbbi uygulamalar gibi çok çeşitli alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (El Naqa ve Murphy, 2022). Şekil 1'de derin öğrenme modeli eğitim sürecine ilişkin bir şematik gösterim verilmiştir.

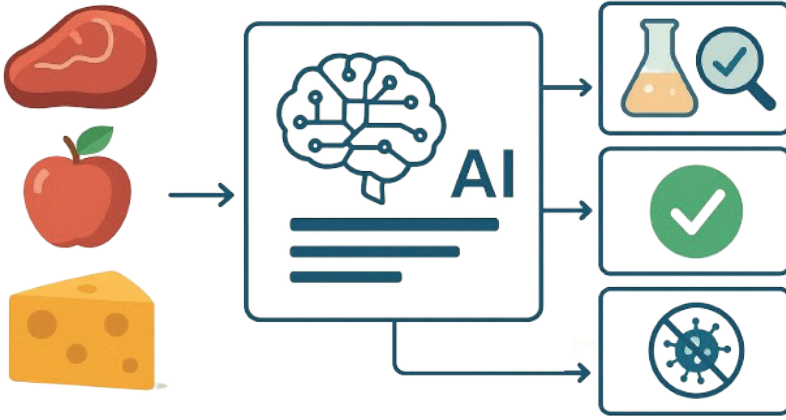


Şekil 1. Derin öğrenme modeli eğitim süreci şematik gösterim

Son yıllarda derin öğrenme modelleri, giderek artan bir popülerlik kazanmış olup, gıda işleme ile tarım alanlarında; algılama, tanıma ve sınıflandırma gibi görevlerle ilgilenen birçok bilgisayarlı görü uygulamasında en ileri teknoloji olarak kabul edilmektedir. Özellikle derin CNN modelleri, nesne tanıma, uzaktan algılama, çevresel izleme ve hiper spektral görüntüleme (HSI) tabanlı sistemler gıda işleme uygulamalarında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Al-Sarayreh ve ark., 2020).

Gıda analizleri ve kalite değerlendirilmesinde yapay zeka, üretim sürecinde veri analizi ve doğruluğunu sağlayarak gıda alanında kullanım olanağı bulmuştur. Derin öğrenme, yapay zekanın alt kümesi olarak insan beyninin işleyişini taklit eden, veri dönüşümü ve girdi bilgilerini özetleyen birbirine

bağlı nöronlardan oluşan katmanlar olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2’de derin öğrenme tabanlı gıda güvenliği analizine ilişkin bir şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 2. Derin öğrenme tabanlı gıda güvenliği analizine ilişkin şematik gösterim

Görüntüler ile spektral desenler ve moleküler bileşim gibi yapılandırılmamış verileri işlemek mümkündür. Araştırmalar, derin öğrenme algoritmalarıyla birleştirilen analitik yöntemlerin, gıda özgünlüğü analizi ve kalite tespitinde yaygın bir şekilde kullanıldığını belirtmektedir. CNN ve yinelemeli sinir ağı (RNN) gibi geleneksel derin öğrenme modelleri, sıralı veya uzamsal verilerle çalışırken karmaşık doğrusal olmayan ilişkilerde sınırlamalar ve zorluklar bulunmaktadır. Sınırlı açıklama yapmaları nedeniyle daha karmaşık gıda kalitesi ve özgünlük tanılama durumlarında kullanılamazlar (Shen, ve ark., 2025).

Ekonomik istikrar ve küresel sağlık için gıda kalitesi ve güvenliği kritik bir öneme sahiptir, ancak kimyasal analizler ve mikrobiyal kültürleme gibi geleneksel değerlendirme yöntemleri genellikle zor ve zaman alıcıdır. Bu uygulamalar gerçek zamanlı ve yüksek verimli durumlar için uygun değildir. Görüntüleme yöntemleri (örneğin, kırmızı-yeşil-mavi (RGB) görüntüleme, HSI) ve spektral yöntemler (örneğin, yakın kızılötesi (NIR) spektroskopisi) dahil olmak üzere optik teknikler, numunenin bütünlüğünü bozmadan, gerçek zamanlı ve hassas değerlendirmeler sağlamaktadır. Ancak, bu tekniklerle oluşturulan karmaşık veri kümeleri, etkili analiz için gelişmiş makine öğrenimi modelleri gerektirmektedir. Bu yöntemler, makine öğrenme ile uyumlu, karmaşık ve çok boyutlu veri kümeleri oluşturarak veri yorumlama ve karar vermede kullanılmaktadır. Optik tahribatsız tekniklerin, rastgele ormanlar (RF) ve destek vektör makineleri (SVM) gibi klasik algoritmalarından CNN gibi derin öğrenme mimarilerine kadar uzanan makine öğrenimi modelleriyle entegre edilmesiyle, özellik çıkarma, sınıflandırma ve tahmin görevleri-

nin otomasyonunda ilerlemeler oluşmuştur. Bu entegrasyon, gıda kalitesi ve güvenliği değerlendirmelerinin hassasiyetini, ölçeklenebilirliğini ve uygulanabilirliğini artırarak, çeşitli gıda sistemlerinde gerçek zamanlı sınıflandırma, ayırma ve mikrobiyal tespit gibi durumları sağlamaktadır. YOLO gibi gelişmiş modeller ile akıllı çiftlikler ve gıda işleme hatları gibi dinamik ortamlarda gerçek zamanlı nesne tespiti potansiyelini daha da genişletmektedir. Gıda bileşenlerinin değişkenliğini, gerçek zamanlı işleme sınırlamalarını ve birden fazla optik modelden gelen verileri entegre etme ihtiyacını karşılamada zorluklar meydana gelmektedir (Wang ve ark.,2025).

GIDA GÜVENLİĞİ VE KALİTESİNDE DERİN ÖĞRENME ÇÖZÜMLERİ

Hayvansal Ürün Alanındaki Uygulamalar

Endüstri 4.0 ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 12 çerçevesinde, et tedarik zinciri yönetiminde yapay zekanın uygulanabilirliğini ortaya koyan bir çalışmada sağlıklı etleri bozulmuş etlerden ayıran bir sınıflandırıcı, Derin CNN ve Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmaları kullanılarak %100 doğrulukla eğitilmiştir. Önerilen model, et tedarik zincirinin farklı aşamalarında uygulanarak ayırma sürecini otomatikleştirmekte, böylece verimliliği artırmakta, maliyetleri düşürmekte ve bozulmuş etlerin sağlıklı etler üzerindeki bakteriyel etkilerini önlemektedir. Ayrıca, bu yaklaşımın etin raf ömrünü uzatarak tüketici güvenliğini ve et tercihini arttıracak, dolayısıyla ekonomik verimliliğe de olumlu katkı sağlayacağı belirtilmiştir (Amani ve Sarkodie, 2022).

Kırmızı etin tanımlanması ve doğrulanması, et endüstrisi için kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla sınırlı spektral bilgi sağlayan ve taşınabilirlik ile video görüntüleme hızına ilişkin avantajlar sunan anlık HSI sistemlerinin potansiyeli ve güvenilirliği incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda et türlerinin sınıflandırılmasında derin öğrenme modellerinin, özellikle 3D konvolüsyon sinir ağı mimarisinin performans ve dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Nisel ve görsel analizler sonucunda önerilen modelin, kısmi en küçük kareler ayırıcı analizi ve SVM tabanlı modellerden üstün performans sergilediğini açıkça ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, söz konusu 3D konvolüsyon sinir ağı modeli, gıda ve tarım alanındaki benzer sınıflandırma problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabileceği ifade edilmiştir (Al-Sarayreh ve ark., 2020).

Gıda güvenliği açısından tavuk göğsü tazeliğinin doğru belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Ancak geleneksel yöntemler; yüksek maliyet, düşük verimlilik ve sınırlı belirleme kabiliyeti nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Yapılan bir araştırmada, tavuk göğsü tazeliğini tahribatsız olarak belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir derin öğrenme modeli olan YOLOv8n_CA_DSC3 kullanılmıştır. Farklı ışık yoğunlukları ve örnekleme koşulları altında topla-

nan örnekler; toplam aerobik bakteri sayısı, koliform sayısı ve pH değerlerine göre yedi farklı tazelik seviyesinde sınıflandırılmıştır. Veri seti, sekiz farklı veri artırma yöntemi ile genişletilmiş ve toplam 34.380 örnek elde edilmiştir. Model performansını artırmak için evrimsel katmanlar DCNv3 modülleri ile değiştirilmiş, ayrıca CA dikkat mekanizması eklenerek çok kanallı özellik birleştirme güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, algoritmanın %95,6 doğruluk, IoU=0,5'te %97,5 ve IoU=0,5:0,95'te %77,5 ortalama hassasiyet sağladığını göstermektedir. Bu değerler, orijinal YOLOv8n'e kıyasla sırasıyla %5,3, %5,1 ve %6,1'lik iyileştirmeler sunmaktadır. Çalışma, tavuk göğsü tazeliğinin hızlı, doğru ve tahribatsız tanınması için güçlü bir teknik çözüm ortaya koymakta ve gıda güvenliği alanına önemli katkılar sağlamaktadır. (Jian ve ark., 2025).

Yumurta endüstrisinde hasarların tespiti ve sınıflandırılması, gıda güvenliği ve kaliteli üretim açısından büyük önem taşımaktadır. Tavuk yumurtalarındaki çatlakların ve yüzey kusurlarının otomatik tanınması için yapılan bir çalışmada derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar kullanılmıştır. Hasarlı ve hasarsız olmak üzere iki sınıftan oluşan toplam 794 yumurta görüntüsü üzerinde GoogLeNet, VGG-19, MobileNet-v2 ve ResNet-50 modelleri değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, GoogLeNet modeli %98,73 ile en yüksek sınıflandırma doğruluğuna ulaşmış, VGG-19 %97,45, MobileNet-v2 %97,47 ve ResNet-50 %96,84 doğruluk oranı göstermiştir. Araştırmacılar derin öğrenme algoritmalarının yumurta yüzey hasarlarını yüksek doğrulukla tespit edebildiğini ve kalite kontrol süreçlerinde geleneksel yöntemlere göre daha verimli bir yöntem olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir. Bu yöntemin üretim süreçlerinde hasarlı yumurtaların hızlı ve doğru şekilde ayıklanmasını sağlayarak ürün kayıplarını azaltma potansiyeline sahip olduğu ifade edilmiştir (Cengel ve ark.,2025).

Süt endüstrisinde süt kalitesi analizi için yapay zeka uygulamalarının kullanımı giderek artmaktadır. Ancak geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları, süt spektral verilerinin doğrusal olmayan yapısı ve ön işleme gereksinimi nedeniyle sınırlı performans göstermektedir. Bu durum, önemli özelliklerin kaybına yol açabilmektedir. Derin öğrenme yöntemleri ise ön işleme ihtiyacını ortadan kaldırarak bilgi kaybını azaltmakta ve daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Yapılan bir çalışmada süt kalitesi analizi için, sınıflandırma doğruluğunu artırmayı amaçlayan Hibrit Karışık Derin Öğrenme (Hybrid Blended Deep Learning, HyBDL) modeli kullanılmış ve %98,03 doğruluk oranı, düşük ortalama karesel hata değerleri ve yüksek tekrarlanabilirlik puanı ile klasik DL ve mevcut karışık DL yöntemlerinden üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, NVIDIA Jetson Nano ve düşük seviyeli cihazlarda gerçekleştirilen testler ile modelin gerçek zamanlı süt kalitesi izleme uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceği ifade edilmiştir (Mhapsekar ve ark., 2024).

Bitkisel Ürün Alanındaki Uygulamalar

Tarım ve gıda alanlarında derin öğrenmenin RGB görüntülerinden HSI görüntüleri yeniden yapılandırmak için uygulanması önemli bir gelişmedir. Bu yenilikçi yöntem, HSI teknolojisindeki geleneksel maliyet, karmaşıklık ve taşınabilirlik zorluklarını ele alma potansiyeline sahiptir ve gelişmiş görüntülemeyi çeşitli sektörlerde daha erişilebilir hale getirmektedir. Derin öğrenmeye dayalı yeniden yapılandırma yöntemleri, kolayca erişilebilen RGB görüntüleri aracılığıyla ayrıntılı konumsal ve spektral analiz sağlamaktadır. Derin öğrenmedeki hızlı gelişmelerle birlikte, HSI yeniden yapılandırma teknikleri daha olgun ve verimli hale gelmektedir. Bu tekniklerin tarımsal uygulamalarda, gıda kalitesi değerlendirmesinde ve hasat sonrası değerlendirmede devrim yaratmadaki dönüştürücü potansiyeli vurgulanmaktadır. Yeniden yapılandırma teknolojilerinin tarımda uygulanması henüz erken aşamalarında olmasına rağmen, bu teknolojiler ilerledikçe daha gelişmiş, doğru ve kapsamlı uygulamaları desteklemeleri beklenmektedir. Bu ilerlemeler, tarım ve gıda mühendisliğini dönüştürecek, yeni araştırma fırsatları yaratacak ve operasyonel verimliliği artıracaktır (Ahmed ve ark., 2025).

Patates, hem temel besin kaynağı hem de önemli bir gelir unsuru olarak dünya genelinde stratejik öneme sahiptir. Verim tahmininin doğruluğu, tarımsal kaynakların etkin kullanımı, sürdürülebilirlik ve gıda güvenliği açısından kritik bir faktördür. Patates verimini tahmin etmek amacıyla yapılan bir çalışmada makine öğrenmesi tabanlı K-en yakın komşular (KNN), gradyan artırma, XGBoost ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) ile derin öğrenme tabanlı grafik sinir ağları (GNN), kapılı yinelemeli birimler (GRU) ve uzun kısa süreli bellek ağları (LSTM) karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Modeller, ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama karesel hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) ölçütleriyle değerlendirilmiş ve bulgular, gradyan artırma ($MSE=0,03438$, $R^2=0,49168$) ve XGBoost'un ($MSE=0,03583$, $R^2=0,35106$) güçlü performansına rağmen, GNN'lerin ($MSE=0,02363$, $R^2=0,51719$) en yüksek doğruluk ve genelleme kapasitesini sunduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, LSTM ($MSE=0,03177$) ve GRU ($MSE=0,03150$) modellerinin başarılı bir şekilde kullanıldığını belirlemişlerdir. Çalışma, gelişmiş derin öğrenme yöntemlerinin patates verimi tahmininde yalnızca doğruluğu artırmakla kalmayıp, konumsal ve zamansal örüntüleri yakalayarak sürdürülebilir tarım ve bilinçli karar verme süreçlerine de katkı sağlamıştır (El-Kenawy ve ark., 2025).

Meyvenin olgunluğunun tanımlanması, tarımsal görüntü işleme alanında ilgi görmeye başlamıştır. Geleneksel makine öğrenimi yöntemleri ile karşılaştırıldığında, derin öğrenmeye dayalı yaklaşımlar, meyve görüntülerinden daha karmaşık ve yüksek düzeyde özelliklerin etkin bir şekilde çıkarılmasını sağlamaktadır (Zhou ve ark., 2025).

Coğrafi konumu ve elverişli iklimi sayesinde Tayvan'da yıl boyunca üretilen *Psidium guajava* L. önemli bir tropikal ve subtropikal meyvedir. Bu nedenle *Psidium guajava* L.'nin kalite standardizasyonu çok önemli bir konudur. Yapılan çalışmada araştırmacıların öncelikli amacı hasat edilen meyvelerdeki görünüm kusurlarını tespit etmektir. Kusurları, zararlılardan, hastalıklardan ve insanlardan kaynaklanan hasarlar dahil olmak üzere on üç sınıfa ayırdıkları çalışmada farklı çiftliklerden 189 *Psidium guajava* L. meyvesi toplamışlar ve örnek olarak 1701 görüntü elde etmişlerdir. YOLO v4 önceden eğitilmiş ağ mimarisi, %6,62'lik yanlış pozitif oranı, %5,03'lük yanlış negatif oranı ve %88,15'lik doğruluk ile kusur tespitinde yüksek performansa ulaşmıştır. Ayrıca, *Colletotrichum gloeosporoides*, *Pestalotiopsis psidii* ve *Phyllosticta psidiicola*'nın tespitinde yanlış pozitif ve yanlış negatif tespit oranlarının %9'dan az olduğu, modelin gerçek zamanlı hasat ve sınıflandırma işlemlerinde uygulanabileceği, 13 x 14 piksellik minimum tespit edilebilir hata boyutu ve 12 FPS'lik hesaplama hızı gösterdiği ifade edilmiştir (Chiou ve ark., 2025).

Elma çeşitlerinin Vis-NIR nokta spektrumlarının ve Vis-NIR-HIS tahmin sonuçlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada, üç elmadaki sertlik değişimlerini görselleştirmek için bir Vis-NIR yöntemi önerilmiş ve meyveler arasındaki aralık farklılıklarının tahmin sonuçları üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Araştırmacılar, HIS endeksi istatistiksel yöntemlerinde yapılan kademeli iyileştirmelere ek olarak, CNN'ler gibi derin öğrenme tahmin modellerinin geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca derin öğrenme etkili özellik öğrenimini sağlasa da küçük miktardaki verilerle modelleri doğru bir şekilde eğitmenin zor olduğu ifade edilmiştir (Wang ve ark.,2024).

Hijyen ve Mikrobiyoloji Alanındaki Uygulamalar

Gıda bileşenlerindeki maya türlerinin hızlı tespiti ve sınıflandırılması için, derin öğrenmenin geleneksel kültür tabanlı yöntemlerle ve mikro koloni görüntülemeyele birleştirildiği bir çalışmada derin CNN kullanan maya sınıflandırma modeli kullanılmıştır. Mikro koloniler, morfolojik özelliklerine göre 6 saat içinde farklı mayaları %96,0'lık bir hassasiyet oranı ile sınıflandırılmıştır. Çalışmada daha düşük sınıflandırma performansına sahip olan *D. hansenii* ve *W. anomalus* için sentetik görüntüler oluşturmak amacıyla üretken bir çekışmeli ağ modeli kullanılmış ve sentetik görüntülerin orijinal deneysel verilerle entegrasyonu ile bu türlerin tespiti için ortalama hassasiyeti ve geri çağırma değerini artırdığı tespit edilmiştir (Park ve ark., 2025).

Listeria monocytogenes, dünya çapında ciddi salgınlara yol açan gıda kaynaklı önemli bir patojendir ve listeriyozun önlenmesi için erken tespiti kritik öneme sahiptir. Bakterinin hızlı ve doğru şekilde tanımlanması amacıyla yapılan bir araştırmada YOLOv5 tabanlı bir derin öğrenme yaklaşımı geliştirilmiştir. Steril koşulların sağlanması için tespit sistemine ultraviyole

lamba entegre edilmiş, PALCAM agarda üretilen *L. monocytogenes* görüntüleri modele girdi olarak kullanılmıştır. Sınıflandırma ve regresyon katmanları ile bakterinin tanımlanması gerçekleştirilmiş, ayrıca güçlü LED ışık kaynağı tespit performansını artırmıştır. Geliştirilen sistem ortalama %94 doğruluk oranına ulaşarak yüksek hassasiyet, uygun maliyet ve kullanıcı dostu bir çözüm sunmuştur. Araştırmacılar geliştirilen sistemin gıda güvenliğinin iyileştirilmesinin yanı sıra antibiyotik direncinin azaltılması ve toplum sağlığının korunmasına katkı sağlayabilecek potansiyelde olduğunu ifade etmişlerdir (Ravindhiran ve Dhandapani, 2025).

Mikrobiyal gıda kaynaklı patojenler halk sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmakta, *Salmonella* ise en yaygın ve tehlikeli türlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Salgınların coğrafi kökenlerinin doğru izlenmesi, kontrol ve önleme stratejileri için kritik bir önem taşımaktadır. Mevcut genomik yaklaşımlar ise bu konuda sınırlı hassasiyet sunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, *Salmonella* için hiyerarşik coğrafi kaynak atfı yapan ve bu alana derin öğrenmeyi entegre eden ilk yöntem olan DeepSANet kullanılmıştır. DeepSANet için genomik verilerden derin temsiller elde etmek için Swin Transformatörü, çok seviyeli coğrafi tahminler için paralel hiyerarşik tahminci (PHP) modülü ve farklı ayrıntı düzeylerinde tutarlılığı artırmak için uyarlanabilir hiyerarşik transfer (AHT) kaybı kullanılmıştır. *Salmonella enterica* serovar Enteritidis genom veri seti üzerinde yapılan deneylerde DeepSANet, bölge, alt bölge ve ülke düzeylerinde sırasıyla %91,88, %87,05 ve %80,83 doğruluk oranlarına ulaşarak mevcut yöntemleri geride bırakmıştır. Ayrıca, EnteroBase tabanlı geniş ölçekli veri setiyle yapılan testler, modelin %90'ın üzerinde doğruluk ve farklı serovarlara genelleme yeteneği gösterdiğini ortaya koymuştur. Yalnızca 3.002 cgMLST lokusu kullanılarak elde edilen bu sonuçlar, yöntemin hem verimli hem de pratik olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar derin öğrenmenin gıda kaynaklı patojen gözetiminde güçlü bir araç olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir (Liang ve ark., 2025).

Gıda işleyicilerinin hijyen alışkanlıkları, üretim sürecinde gıda güvenliğinin korunmasında kritik öneme sahiptir. İyi hijyen uygulamaları, el yıkama prosedürleri ve saç filesi, maske, eldiven, koruyucu giysi gibi kişisel koruyucu ekipman kullanımını zorunlu tutmaktadır. Ancak, büyük ölçekli üretimlerde manuel denetimler çoğu zaman verimsizdir. Çalışanların üretim alanına giriş öncesinde el hijyeni ve kişisel koruyucu ekipman uyumluluğunu otomatik olarak değerlendiren bir çalışmada, bilgisayarlı görü ve CNN tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. 20.222 örnekten oluşan veri setiyle YOLOv8, YOLOv7, YOLOv6, YOLOv5, ResNet, DenseNet, MobileNetv2, EfficientNetv2, VGG ve Vision Transformer (ViT) olmak üzere 10 model test edilmiştir. Çalışma bulgulara göre YOLOv6 ve YOLOv8'in el yıkama tanımda %99,9 doğruluk, DenseNet'in ise kişisel koruyucu ekipman tespitinde %95,6 doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Geliştirilen sistemin hijyen standartlarına uyumu artı-

rarak çapraz bulaşmayı önlemede ve gıda güvenliği denetimlerinde verimli bir çözüm olarak kullanılacağı ifade edilmiştir (Chen ve ark.,2025).

SONUÇ

Günümüzde, gıda kalitesi ve güvenliği konusu gelişmekte olan birçok ülke için önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Ortam sıcaklığı ve nemi, ambalaj malzemeleri ve gıdanın doğal kimyasal özellikleri gibi faktörler, depolama süresince bozulmaya neden olmaktadır. Gıda güvenliği ve kalite tespit yöntemleri olarak mikrobiyolojik ve kimyasal analiz yöntemleri maliyetli ve zaman alıcıdır. Gıda ticaretinin küreselleşmesiyle birlikte, üreticilerden tüketicilere kadar olan nakliye mesafesi artarak gıda güvenliğiyle ilgili riskler de ortaya çıkmıştır. Gıda güvenliği standartlarının korunması, halk sağlığını ve gıda endüstrisinin ekonomik bütünlüğünü korumak için hayati önem taşımaktadır. Endüstri 4.0 ve Yapay Zeka teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, derin öğrenme, karmaşık veya büyük veri kümeleri hakkında bilgi çıkarmak ve kararlar almak için imkan tanımaktadır. Veri analizi ve görüntü işleme süreçlerinde yaygın olarak derin öğrenme yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Derin öğrenme, verilerden ve görüntülerden çok katmanlı bir yapı üzerinden özellikleri otomatik olarak çıkarmakta ve bu bilgileri sınıflandırma, regresyon ve tespit için kullanılmaktadır. Son çalışmalar, derin öğrenme algoritmalarının ham verilerdeki kalıpları veya düzenlilikleri otomatik olarak keşfedebileceğini ve öğrenebileceğini göstermiştir. Bu teknoloji, geniş ölçekli örnek veri setlerini kullanarak modelleri optimize etmekte ve geleneksel yöntemlerle çözümlenemeyen karmaşık sorunlara yeni yaklaşımlar ile metodolojiler sunmaktadır. Yapay zeka, gıda güvenliği alanında yüksek potansiyele sahip devrim niteliğinde bir araçtır. Gıda endüstrisi, yapay zeka yeteneklerinden yararlanarak güvenlik sonuçlarını önemli ölçüde iyileştirebilir, operasyonel verimsizlikleri azaltabilir ve tüketici güvenliğini artırabilir. Yapay zekanın bu alandaki sürekli gelişimi, önleme ve proaktif yönetimi önceliklendiren daha akıllı ve daha dayanıklı gıda güvenliği sistemlerinin önünü açarak yenilikçi çözümler ortaya çıkarabilecektir.

Gıda tazeliğinin belirlenmesine yönelik araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin geleceği, gıda kalitesinin hızlı ve güvenilir biçimde değerlendirilmesini sağlayarak derin öğrenme yöntemlerinin ileri görüntüleme teknikleriyle entegrasyonunu içermektedir. Hiperspektral floresan görüntüleme ve multispektral dalga boyu seçimi gibi teknolojilerin derin öğrenme stratejileriyle bir araya getirilmesi, tazelik analizinin gerçek zamanlı yürütülmesinde dönüştürücü bir potansiyele sahiptir. Bu tür entegre yaklaşımlar, geleneksel bozulma tespit yöntemlerinin yavaş ve zahmetli olmasından kaynaklanan kısıtları ortadan kaldırarak akıllı izleme ve hızlı tazelik değerlendirmesi için güçlü bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, gıda bileşenlerinin gerçek zamanlı çoklu sınıf tanımlanmasına yönelik derin öğrenme uygulamaları ile meyve tazeliğini belirlemede enerji verimliliği yüksek modellerin geliştirilmesi, derin öğren-

menin gıda güvenliği ve kalite güvencesindeki geniş kapsamlı potansiyelini ortaya koymaktadır. Gıda endüstrisinin gelişimini sürdürmesiyle birlikte, derin öğrenme ile görüntüleme tekniklerinin birleşimi, tazelik ve güvenlik değerlendirmelerinde hızlı, güvenilir ve yüksek kapasiteli ölçüm yöntemlerine duyulan ihtiyacı karşılamada büyük bir önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, gelecek çalışmalarda görüntüleme tabanlı derin öğrenme uygulamalarının daha da geliştirilmesi ve genişletilmesi, gıda ürünlerinin tazeliği ve kalitesine ilişkin yükselen beklentileri karşılamada odak noktası olacaktır.

KAYNAKÇA

- Ahmed, M. T., Monjur, O., Khaliduzzaman, A., & Kamruzzaman, M. (2025). A comprehensive review of deep learning-based hyperspectral image reconstruction for agri-food quality appraisal. *Artificial Intelligence Review*, 58(4), 96. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11090-w>
- Al-Sarayreh, M., Reis, M. M., Yan, W. Q., & Klette, R. (2020). Potential of deep learning and snapshot hyperspectral imaging for classification of species in meat. *Food Control*, 117, 107332. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107332>
- Amani, M. A., & Sarkodie, S. A. (2022). Mitigating spread of contamination in meat supply chain management using deep learning. *Scientific reports*, 12(1), 5037. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08993-5>
- Cengel, T. A., Gencturk, B., Yasin, E. T., Yildiz, M. B., Cinar, I., & Koklu, M. (2025). Automating egg damage detection for improved quality control in the food industry using deep learning. *Journal of Food Science*, 90(1), e17553. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17553>
- Chen, I. C., Chi, C. H., & Ku, H. H. (2025). Deep learning for the detection of good hygienic practices control measures for food handlers. *Food Control*, 171, 111041. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111041>
- Chiou, K. D., Chen, Y. X., Chen, P. S., Jou, Y. T., Tsai, S. H., & Chang, C. Y. (2025). Application of deep learning for fruit defect recognition in Psidium guajava L. *Scientific Reports*, 15(1), 6145. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88936-y>
- Deng, Z., Wang, T., Zheng, Y., Zhang, W., & Yun, Y. H. (2024). Deep learning in food authenticity: Recent advances and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104344. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104344>
- El Naqa, I., & Murphy, M. J. (2022). What are machine and deep learning?. In *Machine and deep learning in oncology, medical physics and radiology* (pp. 3-15). Cham: Springer International Publishing.
- El-Kenawy, E. S. M., Alhussan, A. A., Khodadadi, N., Mirjalili, S., & Eid, M. M. (2025). Predicting potato crop yield with machine learning and deep learning for sustainable agriculture. *Potato Research*, 68(1), 759-792. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09753-w>
- Jian, R., Li, G., Jun, X., & Shi, G. (2025). Nondestructive freshness recognition of chicken breast meat based on deep learning. *Scientific Reports*, 15(1), 27538. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13576-1>
- Liang, S., Mei, S., Ji, J., Li, B., Xu, M., Chen, M., ... & Zhang, H. (2025). DeepSANet: a deep learning approach for hierarchical geographical source attribution of Salmonella. *Food Research International*, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117554>
- Mhapsekar, R. U., O'Shea, N., Davy, S., & Abraham, L. (2024). Hybrid blended deep learning approach for milk quality analysis. *IEEE Transactions on Emerging*

Topics in Computational Intelligence, 8(3), 2253-2268. <https://doi.org/10.1109/TETCI.2024.3369331>

- Özgür, S. B. (2021). Algoritmalar, yapay zekâ, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve uygulamaları: Beşerî fayda üretiminin yazılımlar tarafından karşılanması. *Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 10(1), 1-29. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/eyad/issue/65425/1009536>
- Paluszek, M., & Thomas, S. (2020). What Is Deep Learning?. In *Practical MATLAB Deep Learning: A Project-Based Approach* (pp. 1-24). Berkeley, CA: Apress.
- Park, H. W., Earles, J. M., & Nitin, N. (2025). Deep learning enabled rapid classification of yeast species in food by imaging of yeast microcolonies. *Food Research International*, 201, 115604. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115604>
- Ravindhiran, R., & Dhandapani, K. (2025). Detection of foodborne *Listeria monocytogenes* using deep learning models to ensure food safety and health. *Journal of Food Science and Technology*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06430-9>
- Shen, C., Jin, Q., Zhou, G., Wang, R., Wang, Z., Liu, D., ... & Xu, B. (2025). Advanced deep learning algorithms in food quality and authenticity. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118374. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118374>
- Singh, R., Nickhil, C., Nisha, R., Upendar, K., Jithender, B., & Deka, S. C. (2025). A comprehensive review of advanced deep learning approaches for food freshness detection. *Food Engineering Reviews*, 17(1), 127-160. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09385-3>
- Wang, X., Feng, Y., Wang, Y., Zhu, H., Song, D., Shen, C., & Luo, Y. (2025). Enhancing optical non-destructive methods for food quality and safety assessments with machine learning techniques: A survey. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101734. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101734>
- Wang, Z., Ding, F., Ge, Y., Wang, M., Zuo, C., Song, J., ... & Pan, L. (2024). Comparing visible and near infrared 'point'spectroscopy and hyperspectral imaging techniques to visualize the variability of apple firmness. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 316, 124344. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124344>
- Zhang, Y., Deng, L., Zhu, H., Wang, W., Ren, Z., Zhou, Q., ... & Wang, S. (2023). Deep learning in food category recognition. *Information Fusion*, 98, 101859. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101859>
- Zhou, L., Zhang, C., Liu, F., Qiu, Z., & He, Y. (2019). Application of deep learning in food: a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 18(6), 1793-1811. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12492>
- Zhou, X., Hu, X., & Sun, J. (2025). A review of fruit ripeness recognition methods based on deep learning. *Cyber-Physical Systems*, 1-35. <https://doi.org/10.1080/23335777.2025.2467639>



SU ÜRÜNLERİNDE DESORPSİYON İZOTERMLERİ VE KURUTMA KİNETİKLERİ

“ ”

Emre KABİL¹

¹ Yalova Üniversitesi, Armutlu Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, 77500 Yalova,
Türkiye ORCID: 0000-0002-2574-196X E-mail: emre.kabil@yalova.edu.tr

1. GİRİŞ

Su ürünleri avcılık ve yetiştiricilik yoluyla üretilmekte olup insan beslenmesi açısından önemli bir gıda olarak kabul edilmektedir (FAO, 2024). Dünyada üretilen ve avlanan su ürünlerinin %89'u insanlar tarafından tüketilirken bu oranın sadece %45'i taze olarak tüketilmektedir (Ghanem vd., 2025). Geri kalan kısım işlenerek tüketilmenin yanı sıra balık yağı ve unu, kozmetik ve farmasötik endüstrisi gibi alanlarda değerlendirilmektedir (Tacon & Metian, 2015). Su ürünleri sahip olduğu besin değeri açısından özellikle protein, yağ asidi, mineral ve vitamin değerleriyle birçok gıdaya göre farklılık göstermekte olup elzem amino asitler ve omega-3 yağ asitleri biyolojik değerini arttırmaktadır. Bu nedenle büyüme ve gelişme, beyin fonksiyonlarının desteği, kardiyovasküler hastalıklar ve diyabet gibi önemli sağlık parametrelerini olumlu yönde etkilemektedir (Noreen vd., 2025). Dünya Sağlık Örgütü günlük enerji ihtiyacının en az %30'unu doymamış yağ asidi içeriği yüksek olan su ürünleri gibi gıdalardan alınması gerektiğini belirtmiştir (WHO, 2018). FAO verilerine göre dünyada su ürünleri tüketimi son yıllarda artış göstermiştir. 1960 yılında yıllık tüketim kişi başına 9 kg iken günümüzde bu miktar 20 kg seviyesindedir. Bu değer dünyada yıllık 162,5 milyon ton tüketime karşılık gelmekte olup özellikle Asya kıtasında kişi başı tüketimin daha fazla olduğu bildirilmektedir (FAO, 2024).

Su ürünleri sahip olduğu yüksek su aktivitesi, nötre yakın pH, yüksek protein ve lipit içeriği ile mikrobiyal ve enzimatik bozulmaya oldukça yatkındır (Wang & Zheng, 2025). Bundan dolayı uygun bir koruma yöntemi uygulanmadığında kısa sürede bozulmakta olup çeşitli işleme, ambalajlama ve depolama yöntemleri ile raf ömürlerinin uzatılması su ürünleri endüstrisinin temel problemleri arasında yer almaktadır. Soğutma ve dondurma işlemi bozulmayı geciktiren ve yaygın kullanılan yöntemler arasında olup tuzlama, fermentasyon, kurutma, vakum ve modifiye atmosferde ambalajlama ile son yıllarda yoğun şekilde araştırılan aktif ambalaj yöntemleri, yenilebilir film kaplamalar, yüksek basınç işlemleri,

soğuk plazma, ışınlama, ultrason gibi yöntemler ile raf ömrü uzatılabilmektedir (Rabiepour vd., 2024). Kurutma, gıdalarda kullanılan en eski koruma yöntemlerinden birisi olup kurutulmuş ürünler dünyada medeniyetler ve toplumlar arasında oldukça popüler ürünlerdir. Kuruyan gıdalarda su aktivitesi azalırken depolama boyunca besinsel kayıplar limitlenmekte, aynı zamanda tüketiciye yeni ve farklı bir ürün sunulmaktadır. Ayrıca kuruma ile ürün hacmi ve ağırlığındaki azalma ambalajlama, depolama ve nakliye giderlerini de azaltmaktadır (Neethu vd., 2025). Su ürünleri kurutularak dünyanın çeşitli bölgelerinde farklı ürünler üretilmektedir. Aşağıdaki tabloda dünya genelinde geleneksel olarak kurutulan bazı balık çeşitleri, kurutma yöntemleri ve kurutulmuş su ürünleri örnek olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Geleneksel olarak üretilen bazı kurutulmuş balık çeşitleri (Fitri vd., 2022)

Balık Çeşidi	Kurutma Yöntemi	Ürün Adı
- Atlantik Morina (<i>Gadus morhua</i>) - Bombay Balığı (<i>Harpadon nehereus</i>) - Yazılı Orkinos - Churi/Ribbon Balığı (<i>Trichiurus lepturus</i>)	- Güneşte Kurutma - Tütsüleyerek Kurutma - Tuzlayarak Kurutma	- Stockfish - Cliffish - Arabushi - Cakalang fufu

Kurutma ile ürünündeki bozulma mekanizmaları yavaşlarken raf ömrü uzamakta ancak güneşte kurutma gibi geleneksel yöntemlerle düşük kaliteli ve kontamine olmuş ürünler üretilmektedir. Bu yüzden kaliteyi arttırmak ve bozulmayı yavaşlatmak için mikrodalga, kızılötesi, ısı pompası gibi kontrollü şartlar altında gerçekleşen kurutma yöntemleri geliştirilmiştir (Neethu vd., 2025). Su, ürün matrisi içerisinde serbest, immobilize ve bağlı olarak temelde 3 farklı şekilde bulunmakta, kuruma da bu özelliğe göre şekillenmektedir (Zhang vd., 2023). Kurutmada temel

amaç ürünlerdeki serbest su içeriğini ve buna paralel olarak su aktivitesini azaltmak, sonuç olarak da ürünlerdeki mikrobiyal ve enzimatik aktiviteyi sınırlandırmaktır. Çünkü enzimatik ve mikrobiyal aktivite ile gıdaların bozulma kinetiği arasında su aktivitesine bağlı bir ilişki bulunmaktadır (Barbosa-Cánovas vd., 2020; Fellows, 2022; Rahman & Labuza, 2007). Su aktivitesi ile nem içeriği arasındaki ilişki sorpsiyon veya desorpsiyon grafikleri ile gösterilmekte, kuruma boyunca belirli bir sıcaklıktaki sorpsiyon özellikleri ise sorpsiyon izotermi olarak adlandırılmaktadır. Su ürünleri yüksek su aktivitesinden dolayı bulunduğu ortamda nem kaybına uğradığından sorpsiyon özellikleri bu bölümde desorpsiyon izotermi olarak belirtilmiştir. Desorpsiyon izotermi sabit bir sıcaklıktaki su aktivitesi ve denge nem içeriği arasındaki ilişkiyi açıklamaya yardımcı olmakta ve proses modellemesi ile saklama koşulları hakkında bilgi vermektedir (Kabil vd., 2012).

Kurutma prosesi tasarımında desorpsiyon izotermine ilave olarak zamanla nem içeriğinin değişimini gösteren kurutma kinetiği de önemli diğer bir husustur (Nisha vd., 2025). Kurutma kinetiği analizinde matematiksel modeller oldukça önemli olup kurutma prosedürünün optimize edilmesini ve elde edilen verilerin endüstriyel olarak kullanılmasını sağlar (Younis vd., 2025). Yapılan kinetik modellemeler ile elde edilen matematiksel verileri dikkate almayarak gerçekleştirilen kurutma işlemlerinde etkinlik, maliyet ve ürün kalitesi açısından olumsuz sonuçlar elde edildiği bildirilmektedir (Ghanem vd., 2025).

Kurutulmuş su ürünleri konusunda gerçekleştirilen araştırmalar incelendiğinde desorpsiyon izotermi ve kurutma kinetiğinin proses tasarımı ve ürün özellikleri üzerine çok fazla etkisi olduğu görülmektedir. Bu bölümde su ürünlerinin kurutulmasında temel mühendislik hesaplamaları arasında yer alan desorpsiyon izotermi ve kurutma kinetikleri detaylandırılmış ve gelecek perspektifleri ele alınmıştır.

2. SU ÜRÜNLERİNDE KURUTMANIN TEMELLERİ

Kurutmanın temel amacı nem içeriğini azaltarak su aktivitesini düşürmektir. Su ürünlerinde bozulmanın en önemli sebeplerinden birisi su aktivitesi olup bu değer en fazla 1 olabilmektedir. İşlenmemiş su ürünlerinde su aktivitesi 0,98-0,99 düzeyindedir ve bu oran mikrobiyal ve enzimatik bozulma için oldukça uygundur (Gram & Dalgaard, 2002; Rahman & Labuza, 2007). Yüksek su aktivitesi değerleri su ürünleri için önemli olan *Pseudomonas spp.*, *Photobacterium phosphoreum* ve *Shewanella putrefaciens* gibi gram negatif bozulma yapan bakteriler için iyi bir ortam olup aktiviteleri sonucu protein ve lipit oksidasyonu ile ürünü bozabilmektedirler (Comi & Iacumin, 2025). *Vibrio spp.* ve *Listeria monocytogenes* gibi patojen bakteriler de su ürünlerinde 0,92 a_w değerinin üzerinde gelişebilmektedir. Böylece kurutulmamış veya az işlenmiş su ürünlerinde güvenlik riski oluşabilmektedir. Patojenlerinin gelişimi 0,90 a_w değerinin altında oldukça sınırlanmaktadır (EFSA, 2018; FDA, 2022; ICMSF, 2011). Su aktivitesi değeri daha da düştükçe bakteri gelişimi azalmakta 0,80-0,85 a_w aralığında ozmofilik mayalar ve bazı küf türleri aktivite gösterebilmektedir. Dolayısıyla kurutulmuş su ürünlerinde özellikle mayalar ve küfler aktivite gösterebilmekte ve bozulma açısından sorun oluşturabilmektedir. Su aktivitesi değerinin 0,60'tan küçük olduğu durumlarda ise üründe mikrobiyal aktivite durmaktadır (Rahman & Labuza, 2007).

Kuruma boyunca ürüne ısı transferi ve üründeki buharın dış ortama taşınması şeklinde temelde iki ana süreç olarak ısı ve kütle transferi meydana gelmektedir (Erbay & Icier, 2010). Kütle transferi ürün içerisinden dışarıya doğru kapiller akış ve difüzyonla gerçekleşir. Su ürünleri yüksek su içeriğine sahip olmakla birlikte bu su serbest, immobilize ve bağlı su olarak ürün matrisi içerisinde yer almaktadır (Rahman & Labuza, 2007).

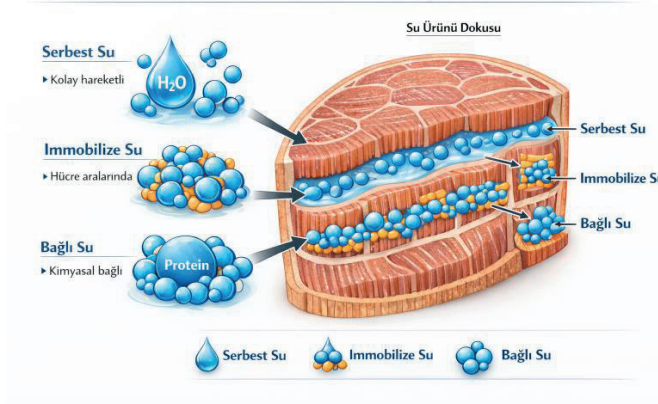
- **Serbest su**, hücreler ve kas lifleri arasındaki boşluklarda bulunmakta olup, mikrobiyal faaliyet ve enzimatik reaksiyonlarda

kullanılan, dondurma ve kurutma proseslerinde en çok hedef alınan su formudur.

- **İmmobilize su**, proteinler arasındaki kapiller yapılar içerisinde bulunan, serbest suya göre hareketi daha kısıtlı olan ancak dokunun zarar görmesiyle serbest suya dönüşebilen su formudur.

- **Bağlı su** ise protein ve diğer makromoleküllere hidrojen bağı ya da iyonik etkileşimlerle tutunmuş, enzimatik reaksiyonlar veya mikrobiyal aktivitede etkisi olmayan, çok düşük derecelerde bile donmayan ve su aktivitesine etki etmeyen su formudur.

Kuruma mekanizması sabit hız periyodu ve düşen hız periyodu olmak üzere temelde iki aşamada gerçekleşmektedir. Sabit hız periyodunda yüzeyden kuruma meydana gelirken ürünün iç kısmından yüzeye doğru sürekli nem hareketi gerçekleştiğinden yüzey devamlı olarak neme doymun durumdadır. Sabit hız periyodunda kuruma hızı ortam nemi ve sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Yüzeyde kabuk oluşumu ve su ürünlerindeki kapiller dokular nedeniyle bu dönem çok kısa sürmekte veya gözlemlenmemektedir. Düşen hız periyodunda ürün yüzeyindeki neme doymunluk azalmakta, kuruma hızı suyun ürün içerisinden yüzeye difüzyon veya kapiller akış hareketiyle daha fazla ilişkilendirilmektedir (Mujumdar, 2014; Rahman & Perera, 2007). Sabit hız periyodundan düşen hız periyoduna geçişteki nem içeriğine kritik nem içeriği denilmektedir. Bu aşamalarda üründen uzaklaşan su büyük oranda serbest su olup immobil su daha yavaş uzaklaşmakta, bağlı su ise çoğunlukla ürün içerisinde kalmaktadır (Mujumdar, 2014). Şekil 1’de su ürünü içerisinde bulunan su formları gösterilmektedir.



Şekil 1 Su ürünleri içerisindeki su formları

Kuruma ürünündeki diğer bileşenlerin yapısını da etkilemektedir. Sıcaklığın etkisiyle proteinlerde meydana gelen denatürasyon ile büzülme sonucu kapiller kanallar daralmakta, bu durum nemin yüzeye aktarımına direnç oluşturmaktadır (Deng vd., 2014). Ayrıca lipid oksidasyonu da kurutma işlemi ile ortam sıcaklığına bağlı olarak hızlanabilmekte, su aktivitesinin düşmesiyle tekrar yavaşlamaktadır (Zeng vd., 2024). Bu bilgilerden de anlaşılabacağı üzere su ürünlerinde gerçekleştirilen kurutma işlemiyle ısı ve kütle transferi, doku ve su yapıları arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Dolayısıyla kurutma işlemi esnasında ürün içi ve ortamdaki parametrelerin kontrolü kaliteli ve güvenilir kurutulmuş ürün kalitesi açısından önem arz etmektedir.

3. DESORPSİYON İZOTERMLERİ ve MODELLENMESİ

Su ürünlerinin işlenmesi, kurutulması, depolanması esnasında çevresi ile olan nem alışverişi özelliklerinin bilinmesi veya modellenmesi mühendislik yaklaşımı açısından bir gerekliliktir. Desorpsiyon izotermi, sıcaklığı ve nispi nemi sabit bir ortamda bulunan su ürününde ortam ile ürün su aktivitesi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Dolayısıyla desorpsiyon izotermi kurutma sürecinin tanımlanmasında denge nem içeriği ve ortam arasındaki ilişkinin bir fonksiyonudur (Ponwiboon & Rojanakorn, 2017). Desorpsiyon izotermi kurutma işleminde proses

modellemesi ve ekipman tasarımı, depolamada oluşabilecek nem geçişleri, ürün stabilitesi, ambalaj materyali seçimi ve son ürün nem içeriğinin belirlenmesi gibi amaçlarla kullanılabilmektedir (Kabil, 2010). İzotermeler Tip I-Tip V olmak üzere beş farklı grupta sınıflandırılmıştır (Brunauer vd., 1938).

- **Tip I** Langmuir tipi izoterm olarak isimlendirilmekte olup su moleküllerinin materyale tek tabaka şeklinde bağlandığı durumu ifade eder. Bu tip izoterm gıdalarda yaygın gözlemlenmemektedir.

- **Tip II** sigmoidal (S şekilli) izoterm olarak bilinmekte olup gıdalarda yaygın görülmektedir. Suyun varlığı ürün matrisi içerisinde üç farklı bölgede görülmektedir. Birinci bölgede su bileşenlerdeki $-OH$, $-NH_2$, $-COOH$ gibi yüksek enerjili bağlanma noktalarına çoğunlukla hidrojen bağları ile bağlanıp su hareketliliği kısıtlıdır. İkinci bölgede su kısmen daha hareketli olup su molekülleri arasındaki etkileşim artmaya başlar. Üçüncü bölgede ise ürün içerisinde su serbest davranışlar ve yüksek difüzyon gösterir. Serbest, immobilize ve bağlı su bölgelerini içeren bu tip izoterm su ürünlerinde karakteristiktir.

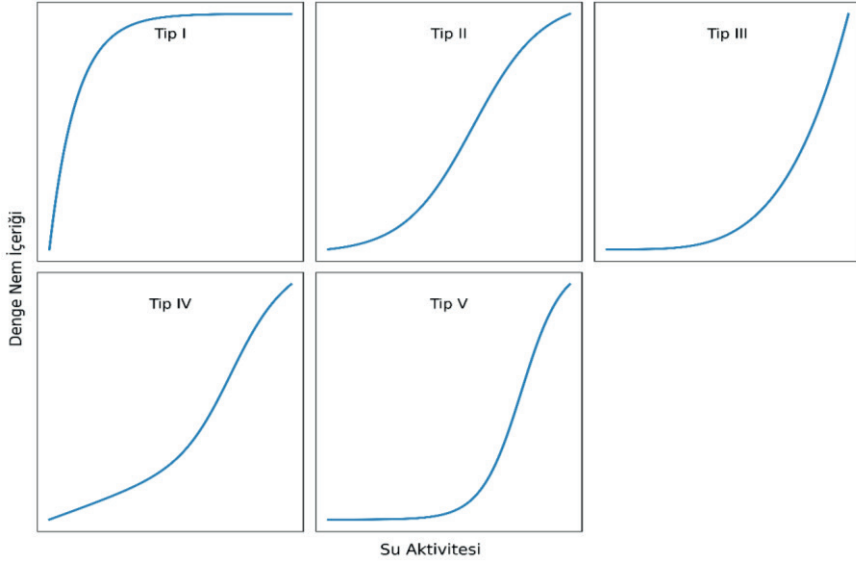
- **Tip III** izoterm düşük su aktivitesi değerlerinde, su tutma kapasitesinin zayıf olduğu şeker içeriği yüksek matrislerde görülmekle birlikte gıdalarda Tip II'ye göre nadir gözlenir.

- **Tip IV** izotermeler Tip II'ye benzemekle birlikte grafiğin eğimindeki artış adsorbat alımını belirtmektedir.

- **Tip V** izoterm ise Tip III'e benzemekte olup nem ile ürün arasındaki bağlanma daha zayıf olmakla birlikte, yüksek su aktivitesi değerlerinde kapiller boşluklar arasında daha belirgin yoğunlaşma gözlemlenir (Basu vd., 2006; Kabil, 2010).

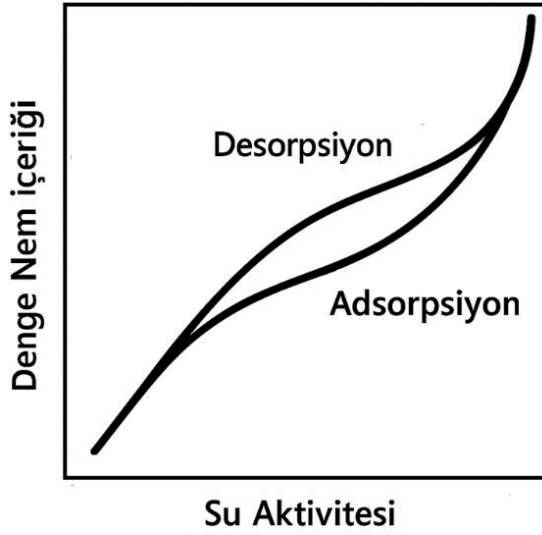
Sorpsiyon izotermeleri genellikle sabit bir sıcaklıkta ürünün denge nem içeriğinin su aktivitesi değerine karşı çizilen grafiği olup yukarıda açıklanan izoterm çeşitlerine ait grafikler Şekil 2'de gösterilmiştir. Tipler arasında farklılığın en önemli nedenlerinden birisi desorpsiyona uğrayan materyalin tek veya çok katmanlı oluşudur. Su ürünleri diğer et ürünlerine

benzer şekilde çok katmanlı yapıda olduğu için Tip II sigmoidal izoterm davranışına uyum sağlamaktadır. Bu durum gerçekleştirilen çeşitli araştırmalarda gösterilmiştir (Ikrang vd., 2019; Ruan vd., 2022; Sablani vd., 2001).



Şekil 2. Sorpsiyon izoterm tipleri

Su ürünleri gibi çok katmanlı gıdalarda Tip II izotermeler üzerinde yapılan çalışmalarda adsorpsiyon ve desorpsiyon izoterm grafikleri arasında farklılık tespit edilmiştir. Histerisis olarak tanımlanan bu durum desorpsiyon izotermine göre daha yüksek denge nem içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir ifadeyle desorpsiyon gerçekleşirken dokular arası boşluklardaki nem içeriğinin yüksek olması kapiller boşluklardaki suyun uzaklaşmasını zorlaştırmakta, adsorpsiyonda ise boşluklar daha yüksek su aktivitelerinde yüksek nem içeriğine ulaşmaktadır (Rahman & Labuza, 2007). Su ürünlerinin kas dokularında da gözüken bu dokusal farklılık suyun yeniden adsorpsiyonunu kısıtlamaktadır. Sorpsiyon histeresisleri genellikle ürünün yapısı ve sıcaklık faktörlerinden etkilenmektedir (Kabil, 2010). Tipik bir histerisis grafiği Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Su ürünlerinde gözüken tipik histeresis grafiği.

Sorpsiyon izotermlerinin belirlenmesinde statik gravimetrik, izopiastik veya dinamik buhar sorpsiyonu gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde amaç belirli bir su aktivitesi değerinde ve sabit sıcaklıkta örnekleri denge nemine ulaştırmaktır. Nem desorpsiyon izotermlerinin modellenmesi elde edilen deneysel verilerin GAB, BET, Halsey, Peleg gibi farklı denklemlere uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu eşitlikler lineer veya nonlineer denklemlerden oluşmaktadır. Tablo 2’de su ürünlerinde sorpsiyon izotermlerinin modellenmesinde kullanılan matematiksel eşitliklerden bazıları sunulmuştur.

Tablo 2. Su ürünlerinde kullanılan bazı sorpsiyon izoterm eşitlikleri

Model	Matematiksel İfadesi	Kullanılan Kaynaklar
GAB	$M_e = \frac{(m_0 c k a_w)}{((1 - k a_w)(1 - k A_w + c k a_w))}$	(Bellagha vd., 2005; Ikrang vd., 2019; Rahman vd., 2019; Ruan vd., 2022; Sablani vd., 2001; Toujani vd., 2011)

BET	$M_e = \frac{(m_0 c a_w)}{((1 - a_w)(1 + (c - 1) a_w))}$	(Rahman vd., 2019; Ruan vd., 2022; Toujani vd., 2011)
Oswin	$M_e = A \left(-\frac{A}{\ln a_w} \right)^{\frac{1}{B}}$	(Bellagha vd., 2005; Ikrang vd., 2019; Ruan vd., 2022; Toujani vd., 2011)
Halsey	$M_e = \left(-\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$	(Ikrang vd., 2019; Ruan vd., 2022; Toujani vd., 2011)
Henderson	$M_e = \left(-\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$	(Ikrang vd., 2019; Ruan vd., 2022)
Peleg	$M_e = m_1 a_w^{n_1} + m_2 a_w^{n_2}$	(Ruan vd., 2022; Toujani vd., 2011)
Smith	$M_e = A + B \ln(1 - a_w)$	(Ruan vd., 2022)

M_e denge nem içeriği, a_w su aktivitesi, $m_0, c, k, A, B, m_1, m_2, n_1, n_2$ modellere ait parametreleri ifade etmektedir.

Yapılan çalışmalarda su ürünlerinde GAB eşitliğinin en yaygın kullanıma ve güvenilirliğe sahip model olduğu, bazı balıklarda Henderson modeline de büyük oranda uyum sağlandığı bildirilmiştir. Model uyumu belirlilik katsayısı, artık kareler toplamı, tahmini standart hata, ortalama bağıl sapma gibi parametrelerin hesaplanmasıyla belirlenmektedir (Basu vd., 2006). Desorpsiyon izoterminden faydalanarak hesaplanan önemli parametrelerden birisi de desorpsiyon izosterik ısıdır. Desorpsiyon izosterik ısı, sabit bir denge nem içeriğinde suyun üründen uzaklaştırılması için ihtiyaç duyulan enerjiyi ifade eder. Diğer bir ifadeyle sıcaklığın etkisine göre su ile ürün arasındaki etkileşimi belirlemede kullanılır (Corrêa vd., 2010). Bu değer kurutma işlemlerinde enerji gereksinimlerini değerlendirmek için kullanılan temel parametrelerdendir. Desorpsiyon izosterik ısı toplam sorpsiyon ısısından, kurutma işlemi yapılan sıcaklıktaki buharlaşma ısısının çıkartılmasıyla belirlenir (Kabil vd., 2012). İzosterik ısı yüksek olması suyun ürüne kuvvetli bağlandığını gösterdiği için bağlı, immobilize ve serbest su geçişleri için

fikir vermektedir. Bu yüzden protein içeriği yüksek su ürünlerinde su ile protein etkileşiminin yorumlanması açısından da önemli bir parametredir.

4. KURUTMA KİNETİĞİ ve MODELLENMESİ

Taze halde nem ve protein içeriğinin yüksek olması su ürünlerinde kuruma prosesini diğer gıdalara kıyasla zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla kurutma sürecinin bilimsel olarak anlaşılabilmesi için desorpsiyon izotermlerine ilave olarak kurutma kinetiklerinin de bilinmesi önem arz etmektedir. Kurutma boyunca suyun ürün içerisinden taşınımı kapiller akış, difüzyon ve buharlaşma gibi mekanizmalarla gerçekleşmektedir (Mujumdar, 2014). Kurutma kinetiği, kuruma prosesi esnasında zamana bağlı olarak nem içeriğindeki değişim ile ifade edilebilir. Aynı zamanda su ürününün kuruma davranışını tahmin etmek, belirlemek ve kurutulmuş gıdanın parametrelerini optimize etmek için gereklidir (Al-Saadi vd., 2025).

Gıdalarda kurutma kinetiğini analiz etmek için yarı teorik modeller başarıyla kullanmıştır. Bu modeller, teorik doğruluk ve pratik uygulanabilirlik arasında bir denge sunarak kurutma işlemlerinin verimli bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Fakat teorik ince tabaka denklemleri, kütle difüzyonu ve iletkenlik gibi faktörleri genellikle göz ardı etmektedir (Fikry vd., 2023). Farklı kurutma yöntemlerinde tipik üç kuruma aşaması bulunmaktadır,

- **Isınma periyodu**, ürün sıcaklığının ortam sıcaklığına yükseldiği aşama olup su ürünlerinde bu aşamada nem kaybı sınırlıdır. Ancak bu aşamada ısınmanın hızlı olması proteinlerde denatürasyona ve sonraki aşamalarda kuruma zorluklarına neden olabilir.

- **Sabit hız periyodu**, su ürünlerinde genellikle kısa sürmekte olup ürün ve ortam sıcaklığı eşitlendikten sonra yüzeydeki nemin buharlaşmasından dolayı kuruma sabit hızda devam etmektedir.

- **Düşen hız periyodu**, yüzeydeki nemin azaldığı, ürün içerisinden yüzeye aktarılan nemin uzaklaştığı evre olup su ürünlerinin

kurutulmasında en uzun süren ve en çok nemin uzaklaştığı dönemdir (Kim vd., 2021).

Kurutma kinetiği ile ilgili hesaplamalarda nem oranı (MR) belirlenen ilk değerlerden olup eşitlik (1) ile ifade edilmektedir.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Burada M_t t anındaki nem içeriğini, M_e denge nem içeriğini, M_0 ise başlangıç nem içeriğini ifade etmektedir. Denge hali teoride sonsuz bir kurutma ile elde edileceğinden uzun süren kurutma süreçlerinde M_e değeri ihmal edilmekte, dolayısıyla MR hesaplamalarında eşitlik (2) kullanılmaktadır (Fikry vd., 2023).

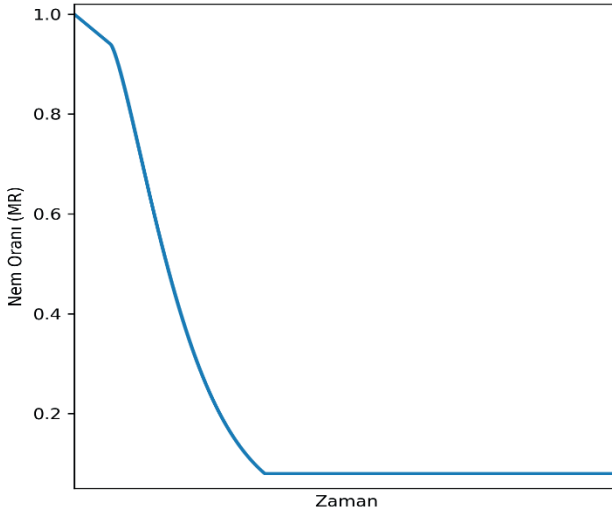
$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

Etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}) eşitlik (3) ile hesaplanmakta iken sıcaklığa bağlı olarak Arrhenius denklemi kullanılarak eşitlik (4) ile belirlenmektedir.

$$MR = \frac{8}{\pi} \exp\left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

$$D_{eff} = D_{eff}^0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

Nem oranından faydalananarak gerçekleştirilen kurutma işlemleri sonucu elde edilen zamana bağlı veriler ile kuruma eğrisi hazırlanır. Su ürünlerinde tipik kurutma eğrisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Su ürünlerinde tipik kurutma eğrisi

Kuruma eğrisi uyumu, kuruma davranışını tanımlamak amacıyla farklı modeller kullanılarak regrasyon veya korelasyon analiziyle gerçekleştirilir. Kinetik verilerin modellenmesinde teorik veya ampirik modeller kullanılmakta olup literatürde Page, Midilli, Logaritmik, Handerson ve Pabis gibi modeller sıklıkla uygulanmıştır. Kuruma davranışını değerlendirmek için en uygun modelin seçimi, belirlilik katsayısı (R^2), korelasyon katsayısı (R), indirgenmiş ki-kare (χ^2), ortalama sapma hatası, kök ortalama kare hatası (RMSE) gibi regresyon analizi değerlerine dayanmaktadır (Delfiya vd., 2021). Tablo 3’te bazı su ürünleri ile ilgili yapılan kurutma kinetiği çalışmalarında kullanılan modeller sunulmuştur.

Tablo 3. Su ürünlerinde kurutma kinetiklerinin modellenmesinde kullanılan denklemler

Model	Matematiksel İfadesi	Kullanılan Kaynaklar	Su Ürünü
Newton (Lewis)	$MR = \exp(-k \cdot t)$	(Agustini vd., 2021; Başlar vd., 2015; Cao vd., 2021; Ghanem	Somon, Alabalık, Karides,

		vd., 2025; Murali vd., 2021)	Tilapia, Hamsi
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	(Agustini vd., 2021; Başlar vd., 2015; Cao vd., 2021; Ghanem vd., 2025; Murali vd., 2021)	Somon, Alabalık, Karides, Tilapia, Hamsi
Midilli ve Küçük	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Cao et al., 2021; Ozyalcin et al., 2023)	Tilapia, Levrek
Logaritmik	$MR = a \exp(-(k \cdot t)) + c$	(Başlar vd., 2015; Murali vd., 2021; Ozyalcin vd., 2023)	Somon, Alabalık, Karides, Levrek
Henderson ve Pabis	$MR = a \exp(-(k \cdot t))$	(Başlar vd., 2015) (Cao vd., 2021) (Agustini vd., 2021)	Somon, Alabalık, Tilapia, Hamsi
Two-Term	$MR = a \exp(-k_0 \cdot t) + b \exp(-k_1 \cdot t)$	(Başlar vd., 2015; Cao vd., 2021; Murali vd., 2021; Ozyalcin vd., 2023)	Somon, Alabalık, Karides, Tilapia, Levrek
Difüzyon Yaklaşımı	$MR = a \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(Murali vd., 2021)	Karides
Logistik	$MR = \frac{b}{1 + a \exp(kt)}$	(Ghanem vd., 2025)	Tilapia
Wang and Singh	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(Başlar vd., 2015)	Somon, Alabalık

MR nem oranı, t zaman, a, b, c, k, n modellere ait parametreleri ifade etmektedir.

Yapılan araştırmalarda su ürünlerinin farklı yöntemlerle kurutulmasında Two-Term, Page, Henderson ve Pabis ile Midilli ve Küçük modellerinin en iyi uyumu gösterdiği tespit edilmiştir (Agustini vd., 2021; Başlar vd., 2015; Cao vd., 2021; Ghanem vd., 2025; Murali vd., 2021; Ozyalcin vd., 2023). Kurutma kinetiği hesabında kurutulan ürün çeşidinin

yanı sıra uygulanan kurutma yöntemi de son derece önemlidir. Literatürde en iyi uyumu sağlayan kurutma çeşidi ve ürün kombinasyonu proses tasarımı ve ürün kalitesinin standardizasyonu açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla kurutma kinetiğinin doğru ifade edilerek, modellere uyumunun belirlenmesi su ürünleri kurutma teknolojisinde mühendislik açısından kalitenin önemli bir basamağıdır.

5. YENİ TRENDLER ve GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Su ürünleri kurutma teknolojisinde kızılötesi ve mikrodalga gibi termal proseslerin yanı sıra yüksek hidrostatik basınç, vurgulu elektrik alan, soğuk plazma, ultrason gibi termal olmayan teknolojik işlemler de güncel literatürde araştırılmaktadır (Wu vd., 2024).

Kurutma sonrası izoterm ve kinetik modelleme araştırmalarında, yeni ve hibrit kurutma sistemlerinin geliştirilmesi, mevcut matematiksel modellerin modifiye edilmesi ile yeni modellerin geliştirilmesi gibi konular öne çıkmaktadır. Örneğin levrek derisine ultrason işlemi uyguladıktan sonra kurutma işlemi gerçekleştirilmiş ve ultrasonun hücre duvarını etkileyerek kuruma süresini kısalttığı tespit edilmiştir (Fikry vd., 2023). Mikrodalga kurutmanın vakumla desteklendiği bir araştırmada optimum güç vakum kombinasyonu belirlenmiş, konvektif kurumaya göre farklı kinetik davranışlar belirlenmiştir (Ruan vd., 2022). Klasik modellerin geliştirilmesine örnek olarak ana yapısal etkiyi, sistem odaklı dış faktörleri ve ürün odaklı iç faktörleri kapsayan Geliştirilmiş Midilli ve Küçük Modeli gösterilebilir (Midilli & Kucuk, 2023). Ayrıca desorpsiyon izotermelerinde GAB, BET ve Halsey gibi modellerin modifiye edilerek kullanıldığı su ürünleri çalışmaları da mevcuttur (Fikry vd., 2024; Saniso vd., 2025).

Desorpsiyon izotermi ve kinetik modelleme üzerine yapılan araştırmalar genellikle model sistemler üzerinde gerçekleştirilmiş olup endüstride kullanılan kurutma sistemlerine uyumluluğuna ait çalışmalar kısıtlıdır. Bu maksatla bilgisayar destekli modelleme yazılımları ile veriler endüstriyel düzeyde modellenabilmektedir. Ayrıca elde edilen kurutma

verileri makine öğrenmesi sonucu yapay zekâ tarafından öğrenilerek farklı uygulamaların tahmin edilebilmesi, su ürünleri kurutma teknolojisinde desorpsiyon izotermi ve kurutma kinetiklerinin belirlenmesi, yeni modellerin türetilmesi açısından gelecekte temel araştırma konuları arasında yer alabilir.

6. SONUÇ

Bu bölümde su ürünlerinde desorpsiyon izotermi ve kurutma kinetikleri incelenmiştir. Desorpsiyon izotermi ve kurutma kinetiklerinin araştırılması su ürünlerinde kurutma süresi ve enerji tüketimi gibi proses özellikleri ile ürün kalitesi açısından vazgeçilmez bir gerekliliktir. Kurutma suyun gıdadan bulunduğu ortama geçişi gibi gözükse de balıklar gibi kompleks kaslı yapılarda dokuda meydana gelen değişimler protein ve su tutma özellikleri ile suyun buharlaşma mekanizmalarını değiştirmektedir.

Desorpsiyon izotermi kuruma esnasında toplam su içeriğini değil enerji düzeyi ve bulunma biçimi hakkında bilgi verir. Dolayısıyla izotermi hedeflenen son su aktivitesi içeriği ve ürün kalitesi açısından önemli bir göstergedir. Çünkü ürünlerdeki suyun mikrobiyal ve enzimatik faaliyetlerde kullanılabilirliği toplam nem içeriğinden çok su aktivitesi ile daha yakından ilişkilidir. Ürün içerisindeki proteinlerin hidrofilik bölgeleri, kas yapısındaki boşluklar ve kanallar aynı nem içeriğinde farklı su aktivitelerinin oluşmasını sağlayabilmektedir. Dolayısıyla izotermi hem su ürününün çeşidine hem de uygulanan işleme göre farklılaşabilmektedir. Desorpsiyon izotermi gözlemlenen önemli bir durum da histerisidir. Bu sadece adsorpsiyon ve desorpsiyon izoterm grafiklerinde gözükken bir farklılık değil, ürün yapısında ve bileşenlerinde meydana gelen değişimin termodinamik yansımasıdır. Ayrıca sabit su aktivitesi değerinde nem hareketinin adsorpsiyon veya desorpsiyon ile gerçekleştiğini de açıklamaktadır.

Kurutma kinetiği zamana bağılı olarak ürünlerdeki nem değişimini tanımlamak ve yapılacak diğer kurutma işlemlerinde tahmini değerler elde etmek için önemli bir parametredir. Su ürünleri kuruma boyunca gözenek yapısının değişimi, shrinkleşme, yüzeyde kabuklanma, protein denatürasyonu, lipid oksidasyonu gibi fiziksel ve kimyasal değişimlere uğrar. Kuruma işlemi de ağırlıkla düşen hız periyodunda gerçekleştiği için Henderson ve Pabis, Midilli ve Küçük, Page, gibi modellere uyum sağlamaktadır.

Desorpsiyon izotermi ve kurutma kinetikleri yapılan çalışmalarda ayrı ele alınmakta bu da veri kayıplarına neden olmaktadır. İzoterm sabit bir su aktivitesi değerinde denge nem içeriği hakkında bilgi verirken kinetik hesaplamalar ile kuruma hızı, kalite ve enerji verimi hakkında bilgi elde edilmektedir. Dolayısıyla bu iki yaklaşımı entegre ederek su ürünlerinde daha anlamlı veriler toplanabilir. İki verinin incelendiği bütüncül yaklaşım ile literatüre daha anlamlı bilgiler eklenebileceği gibi su ürünleri endüstrisinde de ürün kalitesi ile verimliliği arttırmak mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

- Agustini, T. W., Fahmi, A. S., & Riyadi, P. H. (2021). Dried salted anchovy different processing methods: Drying kinetics and modelling. *Food Research*, 5, 70-75. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(S3\).011](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(S3).011)
- Al-Saadi, A., Pathare, P. B., Al-Rizeiqi, M., Al-Bulushi, I., Al-Ismaili, A., Al-Dairi, M., & Al-Belushi, M. (2025). Drying kinetics and color changes of anchovies in solar and open sun drying. *Discover Food*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00442-2>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2020). *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications* (2. bs). Wiley-Blackwell.
- Basu, S., Shihhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006). Models for sorption isotherms for foods: A review. *Drying Technology*, 24, 917-930. <https://doi.org/10.1080/07373930600775979>
- Başlar, M., Kiliçli, M., & Yalınkiliç, B. (2015). Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 495-502. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.018>
- Bellagha, S., Sahli, A., Glenza, A., & Kechaou, N. (2005). Isohalic sorption isotherm of sardine (*Sardinella aurita*): Experimental determination and modeling. *Journal of Food Engineering*, 68(1), 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.041>
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Cao, F., Zhang, R., Tang, J., Li, F., & Jiao, Y. (2021). Radio frequency combined hot air (RF-HA) drying of tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fillets: Drying kinetics and quality analysis. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102791>
- Comi, G., & Iacumin, L. (2025). Spoilage of Meat and Fish. İçinde A. Bevilacqua, M. R. Corbo, & M. Sinigaglia (Ed.), *The Microbiological Quality of Food: Foodborne Spoilers* (2. bs, ss. 221-248). Woodhead Publishing (Elsevier). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91160-3.00017-9>

- Corrêa, P. C., Goneli, A. L. D., Júnior, P. C. A., de Oliveira, G. H. H., & Valente, D. S. M. (2010). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(10), 2016-2022. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02373.x>
- Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (2021). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(6). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>
- Deng, Y., Luo, Y., Wang, Y., Yue, J., Liu, Z., Zhong, Y., Zhao, Y., & Yang, H. (2014). Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration. *Journal of Food Engineering*, 123, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.006>
- EFSA. (2018). *Listeria monocytogenes* contamination of ready-to-eat foods and the risk for human health. İçinde *EFSA Journal* (C. 16, Sayı 1). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5134>
- Erbay, Z., & İcier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- FAO. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. İçinde *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- FDA. (2022). *Fish and Fishery Products Hazards and Controls Guidance* (4. bs). U.S. Food & Drug Administration.
- Fellows, P. J. (2022). *Food Processing Technology: Principles and Practice* (5. bs). Woodhead Publishing.
- Fikry, M., Benjakul, S., Al-Ghamdi, S., Mittal, A., Nilsuwan, K., Fulleros, R., & Dabbour, M. (2024). Sorption Isotherms and Thermodynamic Characteristics of Gelatin Powder Extracted from Whitefish Skin: Mathematical Modeling Approach. *Foods*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/foods13010092>
- Fikry, M., Benjakul, S., Al-Ghamdi, S., Tagrida, M., & Prodpran, T. (2023). Evaluating Kinetics of Convection Drying and Microstructure Characteristics of Asian Seabass Fish Skin without and with

- Ultrasound Pretreatment. *Foods*, 12(16).
<https://doi.org/10.3390/foods12163024>
- Fitri, N., Chan, S. X. Y., Che Lah, N. H., Jam, F. A., Misnan, N. M., Kamal, N., Sarian, M. N., Mohd Lazaldin, M. A., Low, C. F., Hamezah, H. S., Rohani, E. R., Mediani, A., & Abas, F. (2022). A Comprehensive Review on the Processing of Dried Fish and the Associated Chemical and Nutritional Changes. *Foods*, 11(19).
<https://doi.org/10.3390/foods11192938>
- Ghanem, T. H. M., Nsasrat, L. S., Younis, O. S., Metwally, K. A., Salem, A., Orban, Z., Eid, M. H., El-Mesery, H. S., Eldin, A. Z., Elmolakab, K. M., Mahmoud, S. F., & Elwakeel, A. E. (2025). Thin-layer modeling, drying parameters, and techno-enviro-economic analysis of a solar dried salted tilapia fish fillets. *Scientific Reports*, 15(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-87807-w>
- Gram, L., & Dalgaard, P. (2002). Fish spoilage bacteria – Problems and solutions. *Current Opinion in Biotechnology*, 13(3), 262-266.
[https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(02\)00309-9](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(02)00309-9)
- ICMSF. (2011). *Microorganisms in Foods 8: Use of Data for Assessing Process Control and Product Acceptance*. Springer.
- Ikrang, E. G., Okoko, J. U., & Akpan, M. M. (2019). Modeling of Moisture Desorption Isotherm of Tilapia Fish (*Tilapia zilli*). *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 16(6), 15-21.
- Kabil, E. (2010). *Sığır Etlerinde Desorpsiyon İzotermeleri İle Desorpsiyon İzosterik Isılarının Belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kabil, E., Aktaş, N., & Balci, E. (2012). Effect of sodium chloride, sodium nitrite and temperature on desorption isotherms of previously frozen beef. *Meat Science*, 90(4), 932-938.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.035>
- Kim, S. M., Kim, T. K., Kim, H. W., Jung, S., Yong, H. I., & Choi, Y. S. (2021). Quality characteristics of semi-dried restructured jerky processed using super-heated steam. *Foods*, 10(4).
<https://doi.org/10.3390/foods10040762>
- Midilli, A., & Kucuk, H. (2023). Development of a new curve equation representing thin layer drying process. *Energy Sources, Part A:*

- Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 45(4), 9717-9730.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2240740>
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying* (4. bs). CRC Press.
<https://doi.org/doi.org/10.1201/b17208>
- Murali, S., Delfiya, D. S. A., Kumar, K. S., Kumar, L. R. G., Nilavan, S. E., Amulya, P. R., Krishnan, V. S., Alfiya, P. V., & Samuel, M. P. (2021). Mathematical Modeling of Drying Kinetics and Quality Characteristics of Shrimps Dried under a Solar–LPG Hybrid Dryer. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 30(5), 561-578.
<https://doi.org/10.1080/10498850.2021.1901814>
- Neethu, K. C., Aniesrani Delfiya, D. S., Remya, S., Murali, S., & Ninan, G. (2025). Hot-Air-Assisted Infrared Drying for Marinated Anchovy: Effects of Spice Blends on Drying Characteristics and Quality. *Journal of Food Process Engineering*, 48(1).
<https://doi.org/10.1111/jfpe.70026>
- Nisha, Sharma, N., & Mohite, A. M. (2025). Effect of vacuum and through flow drying technique on mathematical modelling, functional properties, color degradation kinetics, and essential oil components of fish mint (*Houttuynia cordata* Thunb). *Food Physics*, 2.
<https://doi.org/10.1016/j.foodp.2025.100057>
- Noreen, S., Hashmi, B., Aja, P. M., & Atoki, A. V. (2025). Health benefits of fish and fish by-products—a nutritional and functional perspective. *Frontiers in Nutrition*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1564315>
- Ozyalcin, Z. O., Kipcak, A. S., & Tugrul, N. (2023). The Effect of Various Methods on the Drying Kinetics and Mathematical Modelling of Seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 32(4), 384-395.
<https://doi.org/10.1080/10498850.2023.2227853>
- Ponwiboon, N., & Rojanakorn, T. (2017). Desorption isotherms and drying characteristics of Nile tilapia fish sheet. *International Food Research Journal*, 24(3), 1292-1300.
- Rabiepour, A., Zahmatkesh, F., & Babakhani, A. (2024). Preservation Techniques to Increase the Shelf Life of Seafood Products: An Overview. *Journal of Food Engineering and Technology*, 13(1), 1-24.
<https://doi.org/10.32732/jfet.2024.13.1.1>

- Rahman, M. S., Al-Khusaibi, M. K., AL-Farsi, K. A., Al-Bulushi, I. M., Abushelaibi, A., & Al-Habsi, N. (2019). Moisture sorption isotherm and thermal characteristics of freeze-dried tuna. *International Journal of Food Studies*, 8(1), 87-96. <https://doi.org/10.7455/ijfs/8.1.2019.a8>
- Rahman, M. S., & Labuza, T. B. (2007). Water activity and food preservation. İçinde M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of Food Preservation* (2. bs, ss. 447-476). CRC Press.
- Rahman, M. S., & Perera, C. O. (2007). Drying and Food Preservation. İçinde M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of Food Preservation*. CRC Press.
- Ruan, J., Li, M., Liu, Y., Ye, B., & Ling, C. (2022). Adsorption isotherm and thermodynamic properties of microwave vacuum dried tilapia fillets. *LWT*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113766>
- Sablani, S. S., Myhara, R. M., Al-Attabi, Z. H., & Al-Mugheiry, M. M. (2001). Water sorption isotherms of freeze dried fish sardines. *Drying Technology*, 19(3-4), 673-680. <https://doi.org/10.1081/DRT-100103943>
- Saniso, E., Hayibaka, M., Chaidana, H., & Techo, J. (2025). Moisture Sorption Isotherm and Isotheric Heat of Sorption of Four-finger Threadfin (Eleutheronema tetradactylum). *Food Biophysics*, 20(2). <https://doi.org/10.1007/s11483-025-09961-y>
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2015). Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 23(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/23308249.2014.987209>
- Toujani, M., Hassini, L., Azzouz, S., & Belghith, A. (2011). Drying characteristics and sorption isotherms of silverside fish (Atherina). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 594-600. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02524.x>
- Wang, X., & Zheng, Z. (2025). Mechanistic Insights into Fish Spoilage and Integrated Preservation Technologies. *Applied Sciences*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/app15147639>
- WHO. (2018). *Healthy diet*. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs394/en/>

- Wu, W., Li, H., Chen, Y., Luo, Y., Zeng, J., Huang, J., & Gao, T. (2024). Recent Advances in Drying Processing Technologies for Aquatic Products. *Processes*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/pr12050942>
- Younis, O. S., Oraith, A. A. T., Metwally, K. A., Dessoky, E. S., Mahmoud, S. F., Rashed, M. N., Tantawy, A. A., Abdallah, S. E., Eid, M. H., Taha, M. F., Saeed, O., & Elwakeel, A. E. (2025). Drying characteristics, environmental and economic analysis of a solar dryer with evacuated tube solar collector for drying Nile Tilapia slices. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94194-9>
- Zeng, J., Song, Y., Fan, X., Luo, J., Song, J., Xu, J., & Xue, C. (2024). Effect of lipid oxidation on quality attributes and control technologies in dried aquatic animal products: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(28), 10397-10418. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2224451>
- Zhang, X., Xue, L., Wu, Z., Zhang, W., Zhang, H., Zhao, C., & Liu, D. (2023). Insight into the Effects of Drying Methods on Lanzhou Lily Rehydration. *Foods*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/foods12091817>



GIDALARA UYGULANAN ISIL UYGULAMALAR VE SOUS VİDE TEKNİĞİ

“ ”

Sabire YERLİKAYA¹

¹ Doç. Dr. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği
Bölümü, Karaman ORCID: 0000-0001-9842-5848

1. Giriş

Gıdalara uygulanan ısı işlemler, geleneksel gıdaların güvenliğinin sağlanmasında, raf ömrünün uzatılmasında ve duyu kalitenin geliştirilmesinde temel bir teknolojik araç olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Kaynatma, pastörizasyon, sterilizasyon, kızartma, fırınlama ve blanşlama gibi klasik ısı uygulamaları; patojen mikroorganizmaların inaktivasyonu, enzimatik reaksiyonların kontrolü ve gıda matrislerinde istenen fiziksel ve kimyasal dönüşümlerin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (Fellows, 2009; Jay ve ark., 2005). Bununla birlikte, bu yöntemler yüksek sıcaklık uygulamaları nedeniyle zaman zaman besin ögesi kayıplarına, duyu değişimlere, oksidatif bozulmalara veya doku sertleşmesine yol açabilmektedir. Bu durum, gıda teknolojisinde daha hassas ve kontrollü ısı işleme tekniklerine olan ihtiyacı artırmıştır. Son yıllarda, modern tüketici beklentilerinin artması, özellikle doğal, besin değeri korunmuş, minimal işlenmiş ve yüksek duyu kaliteye sahip gıdalara olan talebi güçlendirmiştir. Bu beklentiler doğrultusunda gıda sektöründe modern düşük sıcaklık teknolojileri, özellikle sous vide (vakum altında düşük sıcaklıkta uzun süre pişirme) yöntemi ön plana çıkmıştır. Sous vide, gıdaların oksijenden uzaklaştırılmış ortamda kontrollü sıcaklıkta pişirilmesine dayanan, geleneksel yöntemlere kıyasla kalite parametrelerini daha iyi koruyan bir yaklaşım sunmaktadır (Baldwin, 2012). Bu teknikte kullanılan düşük sıcaklık-uzun süre (LTLT) prensibi; kas proteinlerinin kontrollü denatürasyonunu, kollajenin jelatine dönüşümünü, su tutma kapasitesinin artmasını ve oksidatif kayıpların minimum düzeye inmesini sağlar. Dolayısıyla sous vide, hem gastronomi hem endüstriyel üretimde duyu üstünlük sağlayan bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013).

Modern ısı işlem tekniklerinin gelişimi yalnızca sous vide ile sınırlı değildir. Ohmik ısıtma, mikrodalga destekli pişirme, hibrit ısı teknikler ve gelişmiş paketlenme sistemleri, hızlı ısı transferi, ürün merkezine homojen sıcaklık iletimi ve daha kontrollü proses koşulları sağlamaları nedeniyle günümüzde geleneksel ısı işlemlere önemli alternatifler sunmaktadır (Modzelewska-Kapituła ve ark., 2023). Bu yöntemlerin ortak amacı, gıda güvenliğini sağlarken ürün kalitesinin korunması veya iyileştirilmesidir. Özellikle ohmik ısıtma ve mikrodalga pişirme gibi teknolojiler, zaman ve enerji verimliliği açısından endüstriyel ölçekte dikkat çekmekte; buna karşılık sous vide yöntemi ise hem gastronomik kalite hem de ürün standardizasyonu açısından benzersiz avantajlara sahiptir (Gawat ve ark., 2024).

Sous vide tekniğinin popülerlik kazanmasında en önemli etkenlerden biri, farklı gıda gruplarında geniş bir uygulama alanına sahip olmasıdır. Et ve et ürünlerinden balık ve deniz ürünlerine; sebzelerden yumurta ürünlerine; hazır yemeklerden soslu karma ürünlere kadar pek çok gıda, bu teknikle işlenebilmektedir. Bağ dokusu yoğun kırmızı etlerde kollajenin yumuşaması ve tekstürel iyileşme; balıklarda oksidatif bozulmanın ve pigment kayıpla-

rının azalması; sebzelerde renk stabilitesinin ve besin değerinin korunması; yumurtada ise jel yapısının hassas kontrol edilebilmesi, sous vide tekniğini gıda bilimi açısından önemli bir yere taşımaktadır (García-Segovia ve ark., 2007; Czarnowska-Kujawska ve ark., 2023).

Sous vide yöntemi yalnızca kaliteyi artırmakla kalmaz; doğru sıcaklık süre kombinasyonlarıyla uygulandığında mikrobiyolojik güvenlik açısından da etkili bir pastörizasyon sağlayabilir. Ancak düşük sıcaklık uygulanan gıdalarda sporlu mikroorganizmalar veya psikrotrofik türler açısından risk oluşturabilecek durumlar literatürde vurgulanmakta; bu nedenle sous vide'in doğru uygulanması, hızlı soğutma ve soğuk zincirin korunması büyük önem taşımaktadır (Yıkmış ve ark., 2018; Stankov ve ark., 2020).

Bu bölümde, gıdalara uygulanan ısı işlemlerin bilimsel temelleri ele alınmakta; sous vide tekniğinin tarihsel gelişimi, fiziksel-kimyasal prensipleri, proses kontrol kriterleri ve güvenlik parametreleri incelenmektedir. Ayrıca sous vide'in farklı gıda gruplarındaki uygulamaları ve bu yöntemin hem endüstriyel hem de gastronomik açıdan sunduğu fırsatlar değerlendirilmektedir.

2. Geleneksel Isıl Uygulamalar

Geleneksel ısı işlemler, gıdaların mikrobiyolojik güvenliğini sağlamak, raf ömrünü uzatmak ve istenen duyuşal nitelikleri oluşturmak amacıyla yüzyıllardır kullanılan temel yöntemlerdir. Bu işlemler sıcaklığın belirli sürelerde uygulanmasıyla mikroorganizmaların inaktivasyonu, enzimlerin denatürasyonu ve kimyasal değişimlerin kontrol edilmesi esasına dayanır. Sıcaklığın gıda bileşenleri üzerindeki etkileri protein denatürasyonu, nişasta jelatinizasyonu, yağ oksidasyonu ve aroma bileşenlerinin dönüşümü gibi çok yönlü fizikokimyasal değişimleri içermektedir (Fellows, 2009).

Isıl işlemlerin temel amacı patojen mikroorganizmaların inaktivasyonudur. Bu bağlamda ısının mikroorganizma hücre duvarı, membran yapısı, enzim fonksiyonları ve DNA bütünlüğü üzerindeki etkileri kritik rol oynar. Isıl prosesler, özellikle *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* ve *Escherichia coli* O157:H7 gibi patojenlerin kontrolünde etkin yöntemlerdir (Jay ve ark., 2005).

Kaynatma, gıdanın 100°C civarında belirli bir süre ısıtılması işlemidir. Ev tipi pişirme teknikleri içinde en yaygın ve en eski ısı işlemlerden biridir. Kaynatma işlemi, suda çözünür vitaminlerin ve mineral maddelerin gıdadan suya geçmesine neden olabilmekte; ancak mikrobiyal güvenlik açısından oldukça etkilidir (Ramaswamy ve Marcotte, 2006). Kaynatma, özellikle sebzeler, yumurta, süt ürünleri ve et türevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pastörizasyon, genellikle 60–90°C aralığında uygulanan ve patojen mikroorganizmaların çoğunu elimine eden, ancak gıdanın duyuşal karakteristiğini büyük ölçüde koruyan ılımlı bir ısı işlemidir. Süt pastörizasyonu (LTLT,

HTST yöntemleri) en bilinen uygulama olup, ısı-süre kombinasyonları gıdanın risk faktörlerine göre optimize edilmektedir. Pastörizasyonun en kritik noktası, ısıya dirençli enzimler ve sporlar üzerinde sınırlı etki göstermesidir; bu nedenle ürünler genellikle soğuk zincirde muhafaza edilmelidir (Walstra ve ark., 2006).

Sterilizasyon, genellikle 121°C civarındaki yüksek sıcaklıkların basınç altında uygulanmasıyla sporlu bakterilerin dahi tamamen inaktive edildiği güçlü bir ısıl işlemdir. Konserve gıdaların üretiminde ticari sterilite standardına ulaşmak için uygulanmaktadır. Sterilizasyon işlemi, gıdanın kimyasal bileşimi, pH değeri ve ambalaj tipi ile yakından ilişkilidir. Düşük asitli gıdalar (pH > 4.6) özellikle *Clostridium botulinum* sporlarına karşı termal işlem gerektirdiğinden ısıl prosesin validasyonu zorunludur (Holdsworth ve Simpson, 2016).



(a)

(b)

(c)

Şekil 1. Kaynatma (a), kızartma (b) ve blanşlama (c) örnekleri

Fırınlama, sıcak havanın konveksiyon yoluyla gıdanın dış yüzeyine iletilmesi ve iç kısımlara doğru ilerleyen ısı ile pişirme prensibine dayanır. Ekmek, pastalar, et ürünleri ve sebzeler için yaygın olarak kullanılan bu yöntem, Maillard reaksiyonu, karamelizasyon ve kabuk oluşumu gibi önemli kimyasal reaksiyonları tetikler. Bu süreç, ürünün renk, aroma ve doku gelişiminde kritik rol oynar (Cauvain ve Young, 2007).

Kızartma; gıdanın genellikle 160–190°C sıcaklıktaki yağ içinde pişirilmesi işlemidir. Yüksek sıcaklık, ürünün dış yüzeyinde hızlı kuruma ve kabuk oluşumuna neden olurken iç kısmın daha nemli kalmasını sağlar. Ancak kızartma sırasında yağ oksidasyonu, akrilamid oluşumu ve trans yağ oluşumu gibi istenmeyen reaksiyonlar meydana gelebilir. Bu nedenlerle proses kontrolü (yağ kalitesi, sıcaklık stabilitesi, süre) oldukça önemlidir (Saguy ve Dana, 2003).

Blanşlama, meyve ve sebzelerde enzim inaktivasyonu, renk stabilizasyonu ve tekstür koruma amaçlı uygulanan kısa süreli ısıl işlemdir (Şekil 1). Genellikle 70–100°C aralığında kısa süreli sıcak su veya buhar uygulaması şeklinde gerçekleştirilir. Bu işlem, özellikle dondurulmuş sebzelerde kalite bozulmalarının önlenmesinde kritik öneme sahiptir (Ozdemir ve Devres, 1999).

3. Modern Isıl Pişirme Yaklaşımları

Geleneksel yüksek sıcaklıklı yöntemlerin (kızartma, haşlama, yüksek ısıda fırınlama vb.) yanında, günümüzde gıda mühendisliği ve gastronomide modern ısıl pişirme teknikleri ön plana çıkmıştır. Bu teknikler hem mikrobiyal güvenliğı sağlamak hem de ürünün besin değeri, doku, aroma ve duyuşsal özelliklerini korumayı hedefler. Özellikle hassas sıcaklık kontrolü, homojen ısı dağılımı, enerji ve zaman tasarrufu bu yöntemlerin en önemli avantajlarıdır. Modern tekniklerin ortak amacı, “daha güvenli, daha kaliteli, daha sürdürülebilir ve tüketici beklentilerine uygun” gıdalar üretmektir.

3.1 Sous Vide ve Düşük Sıcaklık – Uzun Süre Pişirme (LTLT)

Sous vide yönteminde gıdalar, vakumlu poşetlerde, su banyosunda oldukça kontrollü sıcaklıklarda pişirilir; bu sıcaklık genellikle suyun kaynama derecesinin altında kalır (Şekil 2). Bu sayede gıdanın dış yüzeyi ile iç kısmı arasında aşırı pişme riski azalır, nem ve aroma kaybı minimize edilir. Bu prensip, “pişme kinetiğini kontrol ederek doku yumuşaklığı, homojen pişme ve besin aroma korunumu” gibi avantajlar sağlar. Bu konuyu genişçe ele alan inceleme yazılarında, sous vide’in geleneksel yöntemlere göre donukluk, lezzet ve doku hassasiyeti açısından avantajlı olduğu vurgulanmıştır (Baldwin, 2012).



Şekil 2. Sous vide yönteminin et ve balık örneklerine uygulanması

Sous vide yöntemi ayrıca mikrobiyal güvenlik ve raf ömrü açısından da avantajlar sunabilir; vakum ambalaj, pişirme sonrası yeniden kontaminasyonu önler ve kontrollü düşük sıcaklık + uzun süre kombinasyonu, patojenleri etkili biçimde baskılayabilir (Yıkılmış ve ark., 2018; Misu ve ark., 2024).

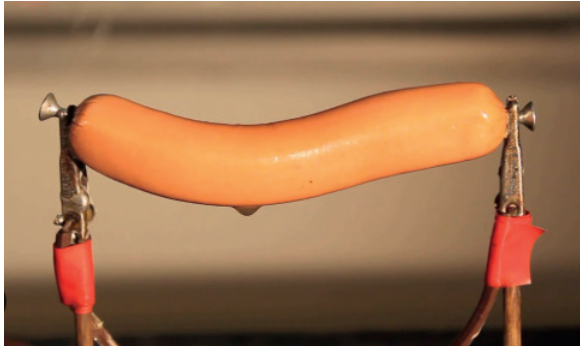
Bununla birlikte, literatürde yöntemin sınırlamaları da belirtilmiştir: düşük sıcaklıkta, yeterince uzun süre işlem yapılmazsa sporlu bakteriler (örneğin anaerobik spor oluşturunucular) risk oluşturabilir; bu durumda ölüm kinetiğı iyi tanımlanmalı ve validasyon yapılmalıdır.

LTLT ve sous vide pişirme, özellikle et, balık, sebze, tavuk gibi çok farklı gıda matrislerinde uygulanabilir. Bu da onları hem gastronomi hem endüst-

riyel üretim için ideal kılar. Örneğin et ürünlerinde dokunun yumuşaması, su tutma kapasitesinin korunması ve aroma bileşenlerinin kaybının azalması sıklıkla rapor edilmiştir (Haskaraca, G., ve Kolsarıcı, 2013).

3.2 Ohmik Isıl İşlem (Elektro-ısıtma)

Ohmik ısıtma, gıdanın içinden elektrik akımı geçirilerek hacim içinde doğrudan ısı üretilmesine dayanan bir yöntemdir (Şekil 3). Bu yöntem, ısıtmanın dışarıdan iletilmesi yerine, gıdanın kendi içinde oluşturulması ile gerçekleştiğinden, özellikle parçalı gıdalarda hızlı ve homojen ısı dağılımı sağlar. Bu mekanizma, elektriğe iletkenliğin yüksek olduğu sıvı ya da yarı-sıvı gıdalarda daha etkilidir (Richa ve ark., 2017; Aurina ve Sari, 2021). Ohmik işlem, geleneksel yöntemlere kıyasla pişirme süresini önemli ölçüde kısaltır, bu da enerji tasarrufu ve üretim verimliliği açısından endüstriyel ölçekte önemli avantajdır.



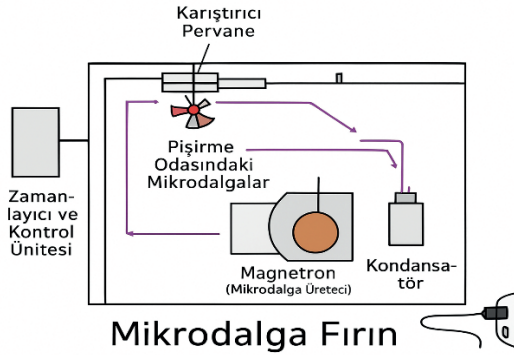
Şekil 3. Gıdalara uygulanan ohmik ısıtma işlemine örnek

Ayrıca gıda kalitesi açısından da olumlu sonuçlar sunar; bazı et ürünlerinde ohmik ısıtmayla pişirme sonucunda daha sabit renk, daha az pişirme kaybı ve tat-doku bütünlüğünün korunması gözlemlenmiştir (Balthazar ve ark., 2024). Bununla birlikte ohmik ısıtmanın sınırlamaları vardır. Gıdanın elektriksel iletkenliği, iyonik bileşenleri (tuz, mineral vs.) ve su içeriği gibi özelliklerine bağlıdır. İletkenliği düşük gıdalarda ısıtma verimliliği düşer. Ayrıca katı gıdaların homojen ısıtılması elektroda yerleştirme, gıda içeriği ve akım yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olduğundan, proses tasarımı iyi yapılmalıdır (Aurina ve Sari, 2021).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, ohmik ısıtmanın et ürünlerinde yapısal ve fonksiyonel kaliteyi koruyarak mikrobiyal güvenlik sağlayabildiği rapor edilmiştir, bu da onu modern pişirme yöntemleri arasında önemli bir alternatif haline getirmektedir (Balthazar ve ark., 2024).

3.3 Mikrodalga Destekli Isıl İşlem

Mikrodalga (MW) ısıtma, dielektrik ısıtma prensibine dayanır; mikrodalgalar gıdanın su moleküllerini titreştirerek ısı üretir (Şekil 4). Bu, yüzeyden ısı aktarımıyla değil, hacim içinde ısı üretimiyle gerçekleştiği için pişirme süresi oldukça kısadır. Bu yönüyle özellikle hızlı üretim, endüstriyel hatlar veya pratik ev pişirmesi için avantajlıdır (Modzelewska-Kapituła, 2023). Birkaç güncel çalışmada, mikrodalga pişirme ile sous vide arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Örneğin, son yapılan bir çalışmada mikrodalga ve sous vide ile pişirilen etlerin protein yapısı, mikroyapı, pişirme kaybı ve sindirilebilirlik açısından analiz edilmiştir. Bu çalışmada, mikrodalga ile pişirme daha yüksek pişirme kaybı ve daha fazla yapısal hasar oluştururken; sous vide ile pişirme daha yumuşak doku ve daha korunmuş protein yapısı sağlamıştır (Gawat ve ark., 2024).



Şekil 4. Mikrodalga fırın parçaları

Bununla birlikte, mikrodalga pişirme daha kısa sürede mikrobiyal yükü düşürme potansiyeli, üretim hattında hız ve enerji verimliliği gibi bazı parametrelerde avantajlı olabilir. Bazı çalışmalarda hem mikrodalga hem sous vide yönteminin duyu ve mikrobiyolojik kaliteyi koruduğu, mikrodalga yönteminin toplam bakteri sayısını sous vide'e göre biraz daha iyi azalttığı ifade edilmiştir (Modzelewska-Kapituła, 2023). Ancak, mikrodalga ile pişirme sırasında sıcaklık homojenliğinin sağlanması önemli bir zorluktur; bu da özellikle büyük hacimli ya da yoğun yapılı etlerde kalite değişkenliği yaratabilir. Bu nedenle, mikrodalga yöntemi kullanılırken proses parametreleri dikkatli kontrol edilmelidir (Werenska, 2023).

3.4 Kombine ve Hibrit Yöntemler ile Gelişmiş Teknolojiler

Modern pişirme teknolojileri yalnızca tek bir yöntemi kullanmakla kalmayıp, farklı yöntemlerin avantajlarını birleştiren hibrit yaklaşımları da içermektedir. Örneğin, ohmik ısıtma ile vakum paketlenme ve aseptik dolunun bir arada kullanıldığı sistemler, yüksek kalite, mikrobiyal güvenlik ve uzun raf ömrü sağlayabilir. Bu yaklaşım, klasik konserveleme veya retort işlemleri-

ne alternatif olarak önerilmektedir (Ito ve ark, 2014). Ayrıca, modern teknoloji malzeme bilimi ve paketleme teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde, düşük sıcaklıkta pişirme (sous vide) + uygun ambalaj + soğuk zincir stratejileri ile ürünün hem besin değeri hem duyuşsal özellikleri hem de güvenlik düzeyi korunabilmektedir. Bu entegre yaklaşımlar, özellikle et, balık, tavuk ve sebze gibi farklı gıda gruplarında uygulanabilirliği artırmaktadır.

4. Sous Vide Tekniğinin Bilimsel Temelleri

Gıdaların ısı olarak işlenmesi geleneksel olarak yüksek sıcaklık, kısa süre kombinasyonlarını kullanırken, sous vide metodolojisi bu paradigmadan kökten farklı bir yaklaşım getirir. Sous vide, gıdanın vakumlu poşet içinde, kontrollü su banyosu altında, göreceli olarak düşük sıcaklıklarda uzun süre pişirilmesini öngörür. Bu sayede gıdanın dış yüzeyi ile iç kısmı arasında aşırı sıcaklık farkı oluşmadan, homojen bir pişirme sağlanır. Bu pişirme biçimi hem duyuşsal kalite (doku, su tutma, aroma) hem de mikrobiyolojik güvenlik açısından dikkatle kontrol edilebilir (Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013; Akoğlan Kozak ve Baltalı, 2021). Sous vide'in bu temel konsepti gıda teknolojisinde önemli avantajlar sunar; buharlaşma nedeniyle oluşan su ve aroma kayıpları minimize edilir; ısı transferi su aracılığıyla yapıldığı için hem iç hem yüzey sıcaklığı kontrollü biçimde yükselir; pişirme sırasında oksidatif bozulma, renk kaybı ya da doku sertleşmesi gibi klasik pişirme sorunları azaltılabilir (Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013).

Sous vide pişirme, su banyosu içinde yapıldığı için, suyun yüksek ısı iletkenliği ve yüksek özgül ısı kapasitesi devreye girer. Bu sayede poşet içinde vakumlanmış gıdanın çevresindeki su kütlesi sabit tutulur; suyun ısı kapasitesi ve su gıda arası ısı iletimi, poşet içi gıdanın ısısının yavaş, eşit ve kontrollü şekilde artmasını sağlar. Böylece gıdanın yüzeyi ile iç kısmı arasında sıcaklık gradyanı minimize edilir; ısı penetrasyonu dengeli olur ve iç kısım ile yüzey aynı zamanlarda istenen sıcaklığa ulaşabilir. Bu, klasik ızgara/fırın/pot pişirme gibi tekniklerde görülen “dıştan içe pişme, dış kuruma iç pişme, aşırı pişme, su kaybı” gibi problemlerin önüne geçer. Literatürde bu yönüyle sous vide tekniği; düşük kayıpla, yüksek su tutma ve nem koruma, homojen pişirme ve kontrol edilebilir sonuçlar için uygun bir yöntem olarak değerlendirilmiştir (İlyasoğlu, 2021). Ayrıca vakum ambalajın getirdiği havasız ortam, suyun gıda ile temasını iyileştirir, ısı transfer katsayısını artırır. Vakum ile su banyosu, hem ısı yalıtım hem de suyun termal kapasitesini kullanarak daha verimli bir pişirme ortamı oluşturur. Bu da pişirme süresinin optimize edilmesine, ısı dağılımının sabit kalmasına ve sonuçların daha tekrarlanabilir olmasına olanak tanır (Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013).

Sous vide yalnızca duyuşsal kaliteyi değil aynı zamanda mikrobiyal güvenliği de göz önüne alan bir yöntemdir. Vakumlu poşet içinde, kontrollü sıcaklıkta ısı işlem, gıdanın patojenlere karşı direncini artırabilir. Literatürde

belirtilen bir çalışma, toplu beslenme hizmetlerinde sous vide uygulamasının mikrobiyolojik kaliteyi iyileştirdiğini, su kaybı ve oksidasyon gibi bozulma mekanizmalarını azalttığını rapor etmektedir (Yılmaz ve Bilici, 2015). Et ve et ürünlerinde sous vide uygulanmasının mikroorganizma baskılama ve güvenli pişirme yapılmasına elverişli olduğu; aynı zamanda sıcaklık zaman kontrolü sayesinde ürünün iç ısısı homojen olduğunda istenen pişme derecesinin sabit tutulabildiği belirtilmiştir (Akoğlan Kozak ve Baltalı, 2021). Mikrobiyolojik güvenlik, raf ömrü ve besin/aroma koruma hedefleriyle sous vide kullanılırken poşet kalitesi, sızdırmazlık, su banyosunun sıcaklık kontrolü, işlem süresi ve soğutma gibi parametrelerin dikkatle izlenmesi gerekir.

Sous vide işleminin en büyük avantajlarından biri, gıdanın duyuusal, dokusal ve besinsel kalitesini mümkün olduğunca korumasıdır. Geleneksel yüksek ısıda pişirme yöntemleri, su kaybı, yağ buharlaşması, aroma ve lezzet bileşenlerinin uzaklaşması, protein denatürasyonu ve doku sertliği gibi olumsuzluklara yol açabilir. Ancak sous vide yöntemiyle yapılan çalışmalarda; et ve et ürünlerinde su kaybının azaldığı, pişirme sonrası nemin korunduğu, dokunun daha yumuşak ve sulu olduğu ve lezzet/aroma bileşenlerinin muhafaza edildiği gözlemlenmiştir (İlyasoğlu, 2021). Özellikle sert lifli etlerde, sous vide ile yapılan uzun süreli düşük sıcaklık pişirme işlemleri, kollajen gibi bağ dokusu proteinlerinin kontrollü şekilde jelatine dönüşmesini sağlar; bu da pişmiş etin yumuşaklık kazanmasını ve çiğneme kalitesinin artmasını mümkün kılar (Demir, 2024). Ayrıca, vakum ambalaj ve su banyosunun ısı iletkenliği sayesinde besin maddeleri (vitamin, mineral, mineraller vs.) ve aroma bileşenleri buharlaşma/oksidasyon ile kaybolmadan daha iyi korunabilir. Bu, özellikle hassas gıdalar (balık, deniz ürünleri, sebze, meyve, marine edilmiş et vb.) için önemli bir avantajdır.

Sous vide tekniğinin uygulanabilmesi için uygun ekipman (vakum makinesi, sızdırmaz poşetler, su banyosu sirkülatörü vs.) gereklidir. Vakumlama doğru yapılmadığında poşet sızdırabilir; su banyosunun sıcaklığı sabit tutulamazsa iç ısı hedefe ulaşamaz veya homojen pişirme sağlanamaz. Bu, hem gıda güvenliği hem kalite açısından risk oluşturabilir. Ambalaj malzemesinin gıdaya migrasyonu riski, özellikle uzun süreli pişirme ve yüksek sıcaklık uygulamalarında oluşabilecek bir olumsuzluktur (Saruhan ve Yılmaz, 2024). Sous vide tekniği; doğru tasarım, kontrol, hijyen ve ambalaj seçimi ile kullanıldığında, modern gıda üretimi ve gastronomi için güçlü bir araçtır. Ancak uygulamada yeterli eğitim, prosedür standardizasyonu ve güvenlik-kalite dengesi gözetilmelidir.

5. Sous Vide Pişirme Parametreleri

Sous vide yönteminin başarısı, en başta **doğru sıcaklık-süre kombinasyonlarının** belirlenmesine dayanır. Çünkü bu parametreler; hem mikrobiyal güvenlik, hem gıdanın dokusal ve duyuusal kalitesi, hem de raf ömrü üzerinde

doğrudan etkilidir. Bu nedenle sous vide'de işlem protokolleri özenle tasarlanmalı, test edilmeli ve validasyon yapılmalıdır.

5.1. Sıcaklık ve Süre Seçimi

Sous vide pişirmede en kritik parametrelerden biri, uygulanan su banyosu sıcaklığıdır. Literatürde sıklıkla 50–80°C aralığı sous vide için referans sıcaklıklar olarak belirtilir. Bu aralıktaki sıcaklıklar, protein denatürasyonu, su tutma kapasitesi, doku yumuşaklığı ve lezzet/aroma bileşenlerinin korunması gibi kalite parametrelerini etkiler. Özellikle etlerde, 50–60°C aralığı pişmiş etin yumuşaklığı ve su tutma kapasitesi için ideal olarak gösterilmiştir; 70°C üzeri sıcaklıklar ise umami tadı ve aroma oluşumu açısından avantaj sağlayabilmektedir (İsmail ve ark., 2022; Singh ve ark., 2023). Ancak mikrobiyal güvenlik açısından, yalnızca düşük sıcaklığa dayanmak yeterli olmayabilir. Yapılan çalışmalarda yaklaşık 60°C'de 120 dk sous vide uygulamasının (hazırlık tipi, vakum ve pişirme sonrası sonlandırma adımı ile) *Salmonella* ve *E. coli* O157 gibi patojenler üzerinde inhibitör aktiviteye sahip olduğu bildirilmiştir. Buna karşın, sous vide uygulamalarında parçalanmış veya tenderize edilmiş etlerde, iç kısımdaki patojenlerin inaktivasyonundaki verimlilik azalabiliyor; bu da sıcaklık–süre kombinasyonlarının gıda matrisine göre yeniden değerlendirilmesi gerektiğini gösteriyor (Patil ve ark., 2024). Benzer biçimde, tavuk eti üzerinde yapılan çalışmalarda da yaklaşık 60°C'de 60 dakika uygulanan sous vide tekniğinin mikrobiyal yükün uzun süre baskıladığı gösterilmiştir (Haghighi ve ark., 2021). Ancak bu sonuçlar, gıdanın başlangıç mikrobiyal kalitesi, paketlenme koşulları ve sonrası saklama sıcaklığı gibi parametrelerin doğru kontrol edilmesine bağlıdır (Hansen ve ark., 1995; Yıkılmış ve ark., 2018). Sous vide'de sıcaklık ne kadar düşük olursa olsun süre yeterince uzun değilse mikrobiyal güvenlik tam sağlanamayabilir; diğer yandan yüksek sıcaklık kısa süre ile kalite kayıplarına yol açabileceğinden, metod tasarımı dikkatli yapılmalıdır.

5.2. Vakum Paketleme ve Isı Transferi – Paketleme Sızdırmazlığı

Sous vide pişirme; gıdanın vakumlu poşet içinde paketlenmesini içerir. Vakum, havayı ortadan kaldırarak oksidatif bozulmayı ve aerobik mikrobiyal büyümeyi sınırlar; poşet içinde su ve gıda arasında doğrudan ısı iletimi sağlanır ki bu da su banyosunun ısı kapasitesinden tam olarak yararlanmayı mümkün kılar. Bu paketleme şekli; pişirme sürecinin verimliliğini, gıda kalitesini ve tekrarlanabilirliği arttırır (Yıkılmış ve ark., 2018). Ancak bu avantaj, yalnızca paketlemenin doğru, sızdırmaz ve uygun materyalden yapılmış olması hâlinde geçerlidir. Zayıf vakum, sızdıran poşet ya da yetersiz ısı transferi, hem mikrobiyal güvenliği riske atar hem de pişirme sonucunda homojenlik ve kalite sorunlarına yol açar. Bu nedenle, sous vide uygulamalarında vakum kalitesi, poşet tipi, sızdırmazlık kontrolleri ve su banyosuna doğru daldırma (poşetlerin çakışmaması, tamamen suya batırılması) gibi parametreler dik-

katle kontrol edilmelidir (Hansen ve ark., 1995; Baldwin, 2012)

5.3. Soğutma / Saklama ve Soğuk Zincir Uygulamaları

Sous vide pişirme sonrası, eğer ürün hemen tüketilmeyecekse hızlı soğutma ve doğru saklama elzemdir. Aksi halde vakum altında hazırlanmış ve ısı işlem görmüş gıdalar, uygun şekilde soğutulmazsa sporlu veya psikrotrofik bakteriler nedeniyle risk oluşturabilir (Stankov ve ark., 2020; Gal ve ark., 2023). Kümes etlerinde, sous vide sonrası ürünlerin buzdolabı sıcaklıklarında yaklaşık 21 gün saklandığında, mezofilik aerobik bakteri, psikrotrofik bakteri ve *Enterobacteriaceae* sayımları tespit edilemez hâle geldiğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Bu da düşük sıcaklık, vakum ve uygun pişirme kombinasyonunun raf ömrünü ciddi oranda uzattığını göstermiştir. Buna karşılık, soğutma yetersiz veya saklama sıcaklığı kontrolsüz olursa, saklama sürecinde mikrobiyal artış veya paket şişmesi (gaz üretimi) gibi istenmeyen durumlar görülmektedir. Özellikle bazı anaerobik sporlu bakterilerin vakumlu ortamda çoğalabileceği rapor edilmiştir (Hansen ve ark., 1995; Stankov ve ark., 2020; Haghighi ve ark., 2021). Dolayısıyla sous vide protokollerinde, pişirme sonrası çabuk soğutma (örneğin buz banyosu), soğuk zincir devamlılığı (4°C veya donmuş saklama) ve vakum poşet içinde saklama adımları standart olarak tanımlanmalı; aksi hâlde mikrobiyal güvenlik riskinin artacağı unutulmamalıdır.

5.4. Mikrobiyolojik Güvenlik ve Uyumlu Protokoller

Sous vide tekniği, mikrobiyal güvenlik sağlama potansiyeline sahip olsa da; bu, yalnızca uygun parametreler seçildiğinde geçerlidir. Birçok çalışmada, sous vide'in patojen baskılama yeteneği olduğu, ancak bu etkinin kullanılan sıcaklık, süre, vakum kalitesi, başlangıç mikrobiyal yükü ve soğutma/saklama koşullarına bağlı olduğu vurgulanmıştır (Romeo ve ark., 2024). Bu bağlamda, bir çalışmada tavuk ve yumurta gibi hassas gıdalar üzerinde sous vide uygulanırken, uygun parametreler kullanıldığında *Campylobacter*, *Salmonella* ve *Clostridium* sporları gibi tehlikeli mikroorganizmaların önemli oranda indirildiği, ancak bazı durumlarda (özellikle sporlar söz konusu olduğunda) riskin tamamen ortadan kalkmadığı ifade edilmiştir. Bu da gösteriyor ki sous vide süreci tek başına bir "sterilizasyon" değil; dikkatli planlanmış ve validasyonu yapılmış bir "pastörizasyon + soğutma + hijyen + kontrol" zinciri gerektirmektedir. (Singh ve ark., 2023). Bu nedenle, sous vide uygulamalarında klasik gıda güvenliği yönetim sistemi yaklaşımı (HACCP vb.) mutlaka uygulanmalıdır. Kritik kontrol noktaları; hammadde kalitesi, vakum ve paketleme, su banyosu sıcaklık süre, hızlı soğutma, saklama sıcaklığı ve sıcaklık takibi olarak belirlenmelidir (Onyeaka ve ark., 2022).

5.5. Kalite Parametreleri: Doku, Nem Kaybı, Aroma ve Lezzet

Sous vide pişirme parametreleri yalnızca mikrobiyal güvenlik için değil, aynı zamanda gıdanın duyu kalitesi ve besin değeri için de optimize edilmelidir. Uzun süreli düşük sıcaklık pişirme; proteinlerin kontrollü denatürasyonu, kollajen çözünmesi, su tutma kapasitesinin korunması ve iç dokunun homojen pişmesi gibi avantajlar sağlar. Bu da özellikle et, balık ve tavuk gibi protein açısından zengin gıdalarda hassas doku kontrolü imkânı sunar (Shin ve ark., 2023). Ancak pişirme sıcaklığı ve süresi arttıkça (özellikle 60°C üzeri ve uzun süreli işlemlerde) pişirme kaybı (su ve çözünmüş protein kaybı), oksidatif bozulma belirtileri (TBARS artışı vb.), renk değişimi ve aroma değişimi görülebilmektedir. Ördek göğsü eti üzerinde yapılan çalışmada, 60°C'de 60 dk en iyi dengeyi verirken, daha yüksek sıcaklık ve uzun süreli pişirme kimyasal bozulma ve doku kayıplarına neden olmuştur (Gal ve ark., 2023). Bu nedenle sous vide protokolleri geliştirilirken, pişirme parametreleri sadece mikrobiyal olmayan kalite kriterleri dikkate alınarak optimize edilmelidir, yani “en lezzetli / en yumuşak / en sulu” ürün her zaman en güvenli veya en stabil ürün olmayabilir. Bu dengeyi sağlamak için parametre seçimi, gıda tipi, başlangıç koşulları ve hedeflenen son ürün özelliklerine göre yapılmalıdır.

6. Sous Vide Tekniğinin Gıdalara Etkileri

Sous vide teknolojisi, gıdaların vakum altında, genellikle 50–85°C aralığında uzun süre kontrollü pişirilmesi esasına dayanır. Bu yaklaşım, ısı işleminin gıda bileşenleri üzerindeki etkilerini optimize ederek hem kalite hem de güvenlik açısından önemli avantajlar sunar. Düşük sıcaklık uzun süre (LTLT) prensibi, kas proteinlerinin kademeli denatürasyonu ve su kaybının azaltılmasıyla sonuçlanır. Baldwin (2012) çalışmasında sous vide işleminin proteolitik değişimleri daha hassas biçimde yönettiğini ve aşırı denatürasyonun önüne geçtiğini bildirmektedir. Et ürünlerinin fiziksel özellikleri, özellikle pişirme kaybı ve su tutma kapasitesi, sous vide koşullarından doğrudan etkilenir. Kapalı ambalaj ortamı, suyun dış ortama geçişini engelleyerek pişirme kayıplarını azaltır. Bu nedenle sous vide, özellikle endüstride verim kayıplarını azaltma açısından stratejik bir yöntemdir (Przybylski ve ark., 2021). Sous vide işleminin gıdaların renk özelliklerine etkisi, özellikle et ürünlerinde önemlidir. Miyogloblin ve türevlerinin ısıyla oksidasyonu, renk değişimlerinin temel belirleyicisidir. Bu durum, ürünün altın–pembe arasında kalan yumuşak bir ton kazanmasını mümkün kılar (Segovia ve ark., 2007). Aroma bileşenleri açısından sous vide, uçucu bileşiklerin kaybını en aza indiren bir teknolojidir. Vakumlu poşet, hem oksijenle reaksiyonları sınırlamakta hem de aromatik bileşiklerin uçmasını engellemektedir. Bu nedenle sous vide, aromatik stabilitenin kritik olduğu gurme mutfaklarda standart bir uygulama hâline gelmiştir (Kurp ve ark., 2022).

Sous vide işleminin en dikkat çekici avantajlarından biri, besin değerlerinin korunmasıdır. Özellikle vitamin ve fenolik bileşenler ısıya ve oksidasyona duyarlı olduğundan, düşük sıcaklıkta vakum altındaki pişirme süreçleri bu besin öğelerinin yıkımını sınırlamaktadır. Çalışmalarda, sous vide'nin özellikle antioksidan kapasiteyi düşürmeyen nadir pişirme tekniklerinden biri olduğu da belirtilmektedir (Rezler ve ark., 2023). Sous vide tekniği gıda güvenliği açısından doğru uygulandığında güvenli olsa da, düşük sıcaklıklarda yürütülen işlem bazı mikroorganizmalar için risk oluşturabilir. Özellikle *Clostridium perfringens* gibi spor oluşturan bakteriler düşük oksijenli ortamda risk taşımaktadır. Sous vide yüksek kalite sunsa da HACCP protokolleriyle desteklenmelidir (Zavadlav ve ark., 2020).

Balık ve deniz ürünleri, yapısal olarak ısıya daha duyarlı olduklarından sous vide tekniğinden büyük ölçüde fayda görür. Balıklarda kollajen daha düşük sıcaklıklarda çözünür, bu durum ürünün yumuşak ama formunu koruyan bir yapı kazanmasını sağlar. Özellikle premium balık ürünlerinin kontrollü pişirilmesinde sous vide'nin avantajlı olduğu görülmektedir (Baldwin, 2012). Sous vide tekniği sebzelerin dokusal yapısını da önemli ölçüde etkiler. Geleneksel haşlamada hücre duvarındaki pektinlerin hızlı parçalanması sebzeleri yumuşatırken, sous vide işleminde sıcaklık kontrollü olduğu için doku bütünlüğü daha iyi korunur. Özellikle renk kaybı kritik olan brokoli, kuşkonmaz ve havuç gibi sebzelerde bu yöntem tercih edilmektedir (Czarnowska-Kujawska ve ark., 2023). Lipid oksidasyonu da sous vide pişirme sürecinin etkilediği önemli kimyasal dönüşümlerden biridir. Düşük oksijenli ortam oksidatif bozulmayı büyük oranda azaltır ve ürünün raf ömrünü uzatır. Shahidi ve Zhong'un yağ oksidasyonu üzerine kapsamlı incelemesi, düşük sıcaklıkta uygulanan kontrollü ısıнын oksidatif zincir reaksiyonlarını yavaşlattığını ve aromasız oksidasyon ürünlerinin oluşumunu sınırladığını göstermektedir. Bu nedenle sous vide ürünleri daha taze ve oksidatif açıdan kararlı bir profil sergiler.

7. Farklı Gıda Gruplarında Sous Vide Uygulamaları

Sous vide tekniği, düşük sıcaklıkta ve uzun süre kontrollü pişirme prensibine dayandığı için gıdanın yapısal özelliklerini korumada üstün bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Farklı gıda gruplarında uygulandığında dokusal özelliklerin korunması, besin ögesi kayıplarının azalması ve aromatik bileşenlerin stabil kalması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Baldwin, 2012; Yıkılmış ve ark., 2018).

7.1. Et ve Balık Ürünlerinde Sous Vide Uygulamaları

Kırmızı etlerde sous vide tekniği özellikle bağ dokusu yoğun kesimlerde büyük avantaj sağlar. Düşük sıcaklıkta uzun süre pişirme, kollajen yapısının jelatine dönüşmesini kolaylaştırarak ürünün daha yumuşak bir yapı kazanmasına katkı verir. Bu uygulama aynı zamanda su tutma kapasitesini

artırır ve pişme kayıplarını azaltır. Özellikle sığır eti çalışmalarında 55–65°C aralığında 6–24 saat uygulamaların optimum tekstür özellikleri sağladığı bildirilmiştir (Misu ve ark., 2024). Kümes hayvanlarında sous vide işlemi daha düşük sıcaklık profilleri ile gerçekleştirilir. Tavuk göğsü ve hindi etinde 60–64°C’de yapılan pişirme, ürünün hem mikrobiyolojik güvenliğini sağlar hem de klasik yöntemlere göre daha sulu bir iç yapı oluşturur. Deri altı yağ dokusunun erimesi kontrollü bir şekilde gerçekleştiği için aroma bileşenleri de daha homojen şekilde dağılmaktadır (Haskaraca ve Kolsarıcı, 2013).

Balık eti, düşük bağ dokusu içeriği ve hassas protein yapısı nedeniyle yüksek sıcaklıklara duyarlıdır. Sous vide yöntemi, özellikle somon, levrek, alabalık ve morina gibi türlerde protein denatürasyonunu kontrol altında tutarak daha yumuşak ve sulu bir yapı elde edilmesini sağlar (Botinestean et al., 2020). Araştırmalar, 45–55°C aralığında uygulanan pişirme işleminin balık etinin renk stabilitesi, omega-3 yağ asitlerinin korunumu ve duyuusal kabul edilebilirliği açısından avantaj sunduğunu göstermektedir (Modzelewska-Kapituła ve ark., 2023). Kabuklu deniz ürünleri (karides, istiridye vb.) için sous vide yöntemi, özellikle tekstürel sertleşme ve su kaybını azaltmada etkili olmaktadır. Karideste 60°C civarında uygulanan sous vide işlemi, geleneksel haşlama yöntemine göre daha parlak renk, daha elastik doku ve daha düşük pişirme kaybı sağlamaktadır (Zavadlav ve ark., 2020).

7.2. Sebzelerde ve Yumurtada Sous Vide Uygulamaları

Sebzelerde sous vide uygulamaları, besin ögesi kayıplarını azaltması ve renk stabilitesini artırması nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle karotenoid ve klorofil pigmentlerinin ıslak ısıtma yöntemlerine göre daha iyi korunduğu bildirilmektedir. Brokoli, havuç, patates gibi sebzelerde 80–90°C aralığında uygulanan sous vide pişirme, tekstürel bütünlüğü korurken aynı zamanda antioksidan kapasitenin daha yüksek kalmasına olanak tanımaktadır. Sebzelerde en önemli parametre enzim inaktivasyonudur. Özellikle peroksidaz ve polifenol oksidaz gibi ısıya dayanıklı enzimlerin inaktivasyonu için daha yüksek sıcaklık profillerine ihtiyaç duyulmakta, bu nedenle sebzelerde sous vide sıcaklıkları et ve balığa göre daha yüksek tutulmaktadır (Şekil 5) (Czarnowska-Kujawska ve ark., 2023).



Şekil 5. *Sous vide uygulanmış sebze ve yumurta örnekleri*

Yumurta, sous vide tekniğinin duyuşal olarak en çok fark yarattığı gıda gruplarından biridir. Özellikle yumurta akı ve sarısının farklı sıcaklıklarda farklı viskoelastik yapı göstermesi, kontrollü pişirmeyi önemli kılmaktadır. Yumurta sarısı 62–65°C arasında jel benzeri bir yapı kazanırken, yumurta akı daha düşük sıcaklıklarda koagüle olmaya başlar. Bu nedenle sous vide tekniği, şef mutfaklarında “onsen egg” gibi özel ürünlerin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel üretimde de yumurta bazlı ürünlerin pastörizasyonu sırasında sous vide yöntemi, hem mikrobiyal güvenliğı sağlamak hem de ürünün duyuşal niteliklerini korumak için tercih edilmektedir (Romeo ve ark., 2024).

7.3. Hazır Yemeklerde Sous Vide

Hazır yemek sektöründe sous vide yöntemi, porsiyonlanmış ürünlerin uzun raf ömrü ile servis kalitesini bir araya getirmesi nedeniyle kritik bir teknolojidir. Otel, restoran ve catering sektöründe sous vide uygulamaları, standardize porsiyonlar, tekrarlanabilir kalite, daha uzun saklama süresi ve servis sırasında hızlı sonlandırma gibi avantajlar sunar. Ayrıca oksijen geçirimsiz ambalajlar sayesinde lipid oksidasyonu yavaşlamakta, aromatik bileşen kayıpları minimize edilmekte ve ürünler yeniden ısıtıldığında duyuşal bütünlüklerini daha iyi korumaktadır. Endüstriyel ölçekte karma yemeklerin (etli sebze yemekleri, soslu ürünler vb.) sous vide ile hazırlanması, hem gıda güvenliğı hem de iş gücü verimliliğı açısından önem kazanmıştır (Babür ve ark., 2019).

8. Sonuç

Gıdalara uygulanan ısı işlemler, hem gıda güvenliğinin sağlanması hem de ürün kalitesinin kontrolü açısından gıda teknolojisinin en temel bileşenlerinden biridir. Geleneksel yöntemler uzun yıllar boyunca etkili sonuçlar sağlamış olsa da yüksek sıcaklık ve kısa süreye dayalı bu teknikler; besin

öğeleri, duyuşal nitelikler ve dokusal özellikler üzerinde belirgin kayıplara yol açabilmektedir. Bu nedenle günümüzde, daha kontrollü, düşük sıcaklıkta ve kaliteyi korumaya odaklı alternatif yöntemlere olan ilgi artmaktadır. Sous vide tekniğı, bu ihtiyaçlara yanıt veren ve farklı gıda gruplarında uygulanabilirliğı kanıtlanmış önemli bir düşük sıcaklık teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Vakum altında pişirme prensibine dayanan bu yöntem, protein denatürasyonunun kontrollü bir şekilde gerçekleşmesini, oksidatif bozulmaların minimize edilmesini ve gıda matrisinin doğal yapısının korunmasını sağlamaktadır. Özellikle et, balık, sebze, yumurta ve hazır yemek uygulamalarında sous vide'in tekstürel iyileşme, renk stabilitesi, su tutma kapasitesi ve duyuşal üstünlük gibi çok yönlü avantajlar sunduğı görölmektedir.

Sous vide tekniğinin yaygınlaşmasında yalnızca kalite odaklı yapısı değil; aynı zamanda endüstriyel üretime uygunluğu da önemli rol oynamaktadır. Standardize porsiyonlama imkânı, uzun raf ömrü, kontrollü mikrobiyal güvenlik ve yeniden ısıtma süreçlerinde verimlilik, yöntemin hem gastronomik hem de endüstriyel sistemlerde değer kazanmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, yöntemin düşük sıcaklık temeline bağılı olarak doğru pişirme sürelerinin belirlenmesi, hızlı soğutma ve soğuk zincirin korunması gibi uygulama kriterlerine dikkat edilmesi gereklidir.

Bu bölümde sunulan değerlendirmeler, sous vide uygulamalarının gıda teknolojisinde geleneksel ısıl işlemlere güçlü bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle ürün kalitesi, besin değerinin korunması ve duyuşal cazibenin artırılması gibi nitelikler açısından bu yöntemin sağladığı avantajlar, modern tüketici beklentileriyle uyumludur. Gelecekte, sous vide tekniğinin diğer yenilikçi ısıl işlem teknolojileriyle birleştirilmesi, daha yüksek verimlilik, daha güvenli ürünler ve daha gelişmiş kalite kontrol sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda sous vide tekniğinin, hem bilimsel araştırmaların hem de endüstriyel uygulamaların odağında yer alan, modern gıda işleme teknolojilerinin önemli bir bileşeni olmaya devam edeceği öngörülmektedir.

Kaynaklar

- Akoğlu Kozak, M., & Baltalı, B. (2021). Sous-vide tekniğinin pişirme süreci kapsamında değerlendirilmesi. *Aydın Gastronomy*, 5(1), 13–33.
- Aurina, K., & Sari, A. (2021). Ohmic heating: A review and application in food industry. *Advances in Biological Sciences Research*, 19.
- Babür, T. E., Tekinşen, K. K., & Gürbüz, Ü. (2019). Some quality qualifications of cooked meat sous vide in the storage process. *Manas Journal of Engineering*, 7(1), 34–41.
- Baldwin, D. E. (2012). Sous vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*.
- Balthazar, C. F., Pimentel, T. C., Silva, R., Prudencio, E. S., Cruz, A. G., & Mársico, E. T. (2024). Recent findings on the ohmic heating application in meat products. *Current Opinion in Food Science*, 58.
- Cauvain, S., & Young, L. S. (2007). *Technology of breadmaking* (2nd ed.). Springer.
- Christensen, L., Ertbjerg, P., Løkke, M., Vestergaard, C., & Andersen, H. J. (2011). Relationship between collagen characteristics, lipid distribution and sous vide cooking properties of beef. *Meat Science*, 88(1), 1–7.
- Czarnowska-Kujawska, M., Draszanowska, A., Chróst, M., & Starowicz, M. (2023). The effect of sous-vide processing time on chemical and sensory properties of broccoli, green beans and beetroots. *Applied Sciences*, 13(7), 4086.
- Demir, M. (2024). Sous vide pişirme tekniği. apack.com.tr.
- Fellows, P. J. (2009). *Food processing technology: Principles and practice* (3rd ed.). Woodhead Publishing.
- Gál, R., Čmiková, N., Prokopová, A., & Kačániová, M. (2023). Antilisterial and antimicrobial effect of *Salvia officinalis* essential oil in beef sous-vide meat during storage. *Foods*, 12, 2201.
- García-Segovia, P., Andrés-Bello, A., & Martínez-Monzó, J. (2007). Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 813–821.
- Gawat, M., Boland, M., Chen, J., Singh, J., & Kaur, L. (2024). Effects of microwave processing in comparison to sous vide cooking on meat quality, protein structural changes, and in vitro digestibility. *Food Chemistry*, 434.
- Haghighi, H., Belmonte, A. M., Masino, F., Minelli, G., Lo Fiego, D. P., & Pulvirenti, A. (2021). Effect of time and temperature on physicochemical and microbiological properties of sous vide chicken breast fillets. *Applied Sciences*, 11(7), 3189.
- Hansen, T. B., Knøchel, S., Juncher, D., & Bertelsen, G. (1995). Storage characteristics of sous vide cooked roast beef. *International Journal of Food Science and Technology*, 30(3), 365–378.

- Haskaraca, G., & Kolsarıcı, N. (2013). Sous vide pişirme ve et teknolojisinde uygulama olanakları. *Akademik Gıda*, 11(2), 94–101.
- Holdsworth, S. D., & Simpson, R. (2016). Thermal processing of packaged foods. IFST Scientific Information.
- İlyasoğlu, H. (2021). Moleküler gastronomi uygulamaları: Sous vide yöntemi. *Aydın Gastronomy*, 5(2), 157–166.
- Ismail, I., Hwang, Y. H., Bakhsh, A., Lee, S. J., Lee, E. Y., Kim, C. J., & Joo, S. T. (2022). Control of sous-vide physicochemical, sensory, and microbial properties through manipulation of cooking temperatures and times. *Meat Science*, 188, 108787.
- Ito, R., Fukuoka, M., & Hamada-Sato, N. (2014). Innovative food processing technology using ohmic heating and aseptic packaging for meat. *Meat Science*, 96(2), 675–681.
- Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). *Modern food microbiology* (7th ed.). Springer.
- Kurp, L., Danowska-Oziewicz, M., & Kłębukowska, L. (2022). Sous vide cooking effects on physicochemical, microbiological and sensory characteristics of pork loin. *Applied Sciences*, 12(5), 2365.
- Misu, G. A., Canja, C. M., Lupu, M., & Matei, F. (2024). Advances and drawbacks of sous-vide technique: A critical review. *Foods*, 13(14), 2217.
- Modzelewska-Kapituła, M., Pietrzak-Fiećko, R., Zakrzewski, A., & Zakęś, Z. (2023). A comparative study of microwave and sous-vide cooking effects on pikeperch fillets' fatty acid composition and quality attributes. *Applied Sciences*, 13(3), 1253.
- Onyeaka, H., Nwabor, O., Jang, S., Obileke, K., Hart, A., Anumudu, C., & Miri, T. (2022). Sous vide processing: A viable approach for the assurance of microbial food safety. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(9), 3503–3512.
- Özdemir, M., & Devres, Y. O. (1999). Thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 225–233.
- Patil, K., Adhikari, M., Rubinelli, P., Desiree, K., Vierck, K. R., & Acuff, J. C. (2024). Evaluating the safety of sous-vide cooking for beef products inoculated with *Salmonella enterica* and *Escherichia coli* O157. *Journal of Food Protection*, 87(5), 100252.
- Przybylski, W., Jaworska, D., Kajak-Siemaszko, K., Sałek, P., & Pakuła, K. (2021). Effect of heat treatment by the sous-vide method on the quality of poultry meat. *Foods*, 10(7), 1610.
- Ramaswamy, H. S., & Marcotte, M. (2006). *Food processing: Principles and applications*. CRC Press.
- Rezler, R., Krzywdzińska-Bartkowiak, M., & Piątek, M. (2023). The influence of the sous vide cooking time on selected characteristics of pork loin. *Molecules*, 28(16), 6102.

- Rishi, R., Shahi, N. C., Singh, A., Lohani, U. C., Omre, P. K., Kumar, A., & Bhattacharya, T. K. (2017). Ohmic heating technology and its application in meaty food: A review. *Advances in Research*, 10(4), 1–10.
- Romeo, M., Lavilla, M., & Amárita, F. (2024). Microbial food safety of sous vide cooking processes of chicken and eggs. *Foods*, 13(19), 3187.
- Saguy, S., & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep-fat frying: Engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, 56(2–3), 143–152.
- Saruhan, A., & Yılmaz, İ. (2024). Sous vide tekniğinde kullanılan pişirme poşetlerinden gıdalara plastik geçişinin tespit edilmesi. *Anadolu Üniversitesi Mesleki Eğitim ve Uygulama Dergisi*, 3(1), 1–15.
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010). Lipid oxidation and improving the oxidative stability. *Chemical Society Reviews*, 39, 4067.
- Shin, D. M., Yune, J. H., Kim, D. H., & Han, S. G. (2023). Effect of sous-vide cooking conditions on physicochemical, microbiological and microstructural properties of duck breast meat. *Animal Bioscience*, 36(10), 1596–1603.
- Stankov, S., Fidan, H., Rusev, R., & Baeva, M. (2020). Low-temperature cooking method “sous-vide” in the restaurant industry: A review. *Food Science and Applied Biotechnology*, 3(1), 92–102.
- Walstra, P., Wouters, J. T. M., & Geurts, T. J. (2006). *Dairy science and technology*. CRC Press.
- Yıkmış, Ş., Aksu, H., Çöl, B. G., & Demirçakmak, İ. L. (2018). Evaluation of sous-vide technology in gastronomy. *International Journal of Agriculture and Life Sciences*, 4(1), 226–231.
- Yılmaz, H., & Bilici, S. (2015). Toplu beslenme hizmetlerinde alternatif pişirme yöntemi: “Sous vide”. *Gıda*, 40(3), 163–170.
- Zavadlav, S., Blažić, M., Van de Velde, F., Vignatti, C., Fenoglio, C., Piagentini, A. M., Pirovani, M. E., Perotti, C. M., Bursać Kovačević, D., & Putnik, P. (2020). Sous-vide as a technique for preparing healthy and high-quality vegetable and seafood products. *Foods*, 9(11), 1537.



MELATONİNİN İNSAN, HAYVAN VE BİTKİ METABOLİZMASI ÜZERİNDEKİ BİYOLOJİK VE FİZYOLOJİK ETKİLERİ

“ ”

Arzu KAVAZ YÜKSEL¹
Hülya ÖZTÜRK DOĞAN²
Neslihan ÇELEBİ³

1 Atatürk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Erzurum, Türkiye, ORCID no: 0000-0001-8292-9259, Prof. Dr.

2 Atatürk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Erzurum, Türkiye, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, ORCID no: 0000-0002-4072-7744, Doç.Dr.

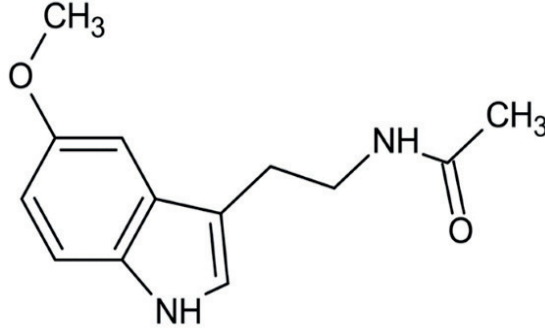
3 Atatürk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Erzurum, Türkiye, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, ORCID no: 0000-0001-7157-5598, Doç.Dr. *Sorumlu Yazar: arzu-kavaz23@hotmail.com; arzukavaz@atauni.edu.tr

1. GİRİŞ

Epifiz bezi ilk olarak MÖ 3. yüzyılda Herophilus tarafından tanımlanmış, yaklaşık 450 yıl sonra Galen bu yapının beynin orta hattında, beyin dokusunun merkezine yakın konumlanan küçük bir endokrin bez olduğunu belirlemiş ve işlevini lenf düğümlerine benzetmiştir (Reiter, 1991a; Moore and Siopes, 2003; Reiter et al., 2009). Omurgalılarda üçüncü ventrikülün tavanında yer alan epifiz bezi, kırmızımsı gri görünümde olup serotonin türevi bir hormon olan melatoninin üretiminden sorumludur. Bu hormon, uyku-uyanıklık döngülerini ve mevsimsel ritimleri düzenleyen temel bileşiklerden biridir (Çam and Erdoğan, 2003). Galen (MS 129–216), bu yapıyı tanımlarken Latince *conarium* terimini kullanmış ve morfolojik olarak çam kozalağının tepe kısmına benzetmiştir. Epifiz bezi Pia mater ile çevrelenmiş olup pinealositler ve glial hücrelerden oluşmaktadır. Boyut olarak küçük olmasına karşın, vücutta böbreklerden sonra en fazla kanlanma gösteren ikinci organ olarak dikkat çekmektedir. Bu bezde çeşitli peptid hormonları sentezlenmekle birlikte, ana salgı ürünü melatonindir (Moore and Siopes, 2003; Reiter, 1991b; Carrillo-Vico et al., 2004).

Melatonin isminin kökeninin ise, Latince “melas” (siyah) ve “tosos” (deri/ton) sözcüklerinin birleşiminden kaynaklanmaktadır (Beyer, 1998; Atasoy, 2019.) ve bu hormon ilk kez 1958 yılında dermatolog Lerner ve çalışma arkadaşları tarafından tanımlanmıştır. Şekil 1’de gösterilen ve 1950’lerin sonlarında sığır epifiz bezi dokusundan izole edilen indolamin yapısındaki bu bileşik, triptofan kökenli N-asetil-5-metoksitriptamin olarak tanımlanmış ve literatürde önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir (Lerner et al., 1958).

Melatonin temel olarak epifiz bezi tarafından sentezlenmekle birlikte, retina, gastrointestinal sistem, deri, trombositler ve kemik iliği gibi çeşitli dokular da bu hormonun ikincil kaynakları arasında yer almaktadır (Bubenik, 2001; Anonymous, 2024a, b). Epifiz bezinde sentezlenen ve karanlık dönemlerde üretimi artan melatonin; güçlü antioksidan kapasiteye sahiptir. Ayrıca, hücresel yenilenmenin desteklenmesi, bağışıklık sisteminin güçlendirilmesi, uyku düzeninin sağlanması ve vücut sıcaklığının kontrolü gibi fizyolojik süreçlerde de önemli roller üstlenmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Melatonin (*N*-asetil-5-metoksitriptamin)

Melatonin biyosentezi, bitkiler, hayvanlar, algler, mayalar ve küfler gibi tüm canlı gruplarında ortak bir başlangıç noktası olan triptofan aminoasidinden kaynaklanmaktadır. Triptofan, ilk olarak serotonin öncüsüne dönüştürülmekte ve ardından pinealositlerde melatonin sentezine yönlendirilmektedir (Beyer, 1998). Bu süreçte görev alan triptofan hidroksilaz enzimi, tetrahidrobiopterin (BH4) ve moleküler oksijeni kofaktör olarak kullanırken, B6 vitamini de reaksiyonun yürütülmesinde temel bir koenzim olarak işlev görmektedir (Brzezinski, 1997).

Melatonin sentezi, triptofan kökenli çeşitli metabolik yollar üzerinden ilerleyebilmekle birlikte, literatürde en yaygın kabul gören biyosentetik yol; triptofan → triptamin → serotonin → 5-metoksitriptamin → melatonin sıralamasını içeren basamaklardan oluşmaktadır. Bu biyokimyasal dönüşümlerin her bir aşamasında farklı enzim grupları rol almakta ve sentezin düzenlenmesinde kritik görevler üstlenmektedir (Zhao, 2019).

Melatonin çeşitli alg türlerinde de tanımlanmış, bu bulguyu takiben molekülün farklı bitkisel dokularda da bulunabileceği de düşünülmüştür (Peggeler et al., 1994). Sonraki araştırmalar, çok sayıda bitki türünün tohum, meyve, yaprak ve kök dokularında yüksek düzeyde melatonin bulunduğunu ortaya koymuştur (Baghurst and Coghill, 2006; Reiter et al., 2009). Ayrıca sebzeler, meyveler, tohumlar, tahıllar, tıbbi ve aromatik bitkiler ile çeşitli süs ve yabani bitki türlerinin de melatonin içerdiği belirlenmiştir (Reiter et al., 2009). Melatoninin yalnızca algler tarafından değil; bakteriler de dahil olmak üzere çok sayıda mikroorganizma tarafından da sentezlenebildiği yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır (Arnao, 2014; Feng, 2014).

Melatonin salgısının sirkadiyen ritmi, yaşla birlikte belirgin bir düzensizlik göstermeye başlamaktadır. Bu hormonunun salgılanmasındaki azalmanın sadece fizyolojik bozukluklarda değil, aynı zamanda duygudurum bozuklukları gibi bazı klinik bozukluklarda da etkili olduğu belirlenmiştir (Claustrat, 1995). Yapılan araştırmalar, melatonin salgılanma düzeylerinin

mevsimsel olarak değiştiğini; kış mevsiminde gecelerin uzamasıyla birlikte üretimin arttığını, yaz aylarında ise daha kısa gecelere bağlı olarak azaldığını göstermiştir. Melatonin sentezi ve salınımı üzerinde etkili olan birçok çevresel ve fizyolojik etmen bulunmakla birlikte, bu süreç üzerinde en belirleyici faktör ışık uyarısıdır. Bu nedenle aydınlık-karanlık döngüsü ile gündüz-gece ritmi, hormonun üretim ve salınımının düzenlenmesinde temel bir kontrol mekanizması olarak rol oynamaktadır. Bu düzenleyici süreç literatürde “foto-nöroendokrin kontrol” olarak adlandırılmaktadır. Işık yoğunluğu, melatonin baskılanma düzeyinin değerlendirilmesinde kritik bir parametredir ve ışığın parlaklığı arttıkça baskılayıcı etkisinin de aynı doğrultuda güçlendiği tespit edilmiştir (Scheer and Czeisler, 2005; Özçelik et al., 2013). Melatoninin fizyolojik etkileri, hedef dokularda bulunan spesifik reseptörler aracılığıyla ortaya çıkmaktadır. Epifiz bezine ek olarak, retina, beyin dokusu, hipofiz bezi, dalak, eritrositler, lökositler, tiroid bezi, timus, plasenta, endometriyum ve gastrointestinal sistem gibi pek çok periferik dokuda melatonin reseptörlerinin bulunduğu saptanmıştır (Atasoy, 2019; Juhnevica-Radenkova and Moreno, 2020; Yılmaz and Gökmen, 2020).

Melatonin hormonunun düzenleyici etkisi, özellikle jet lag, uyku düzensizlikleri ve insomnia gibi bozuklukların hafifletilmesi üzerinedir. Bunun yanı sıra, insan biyokimyasal metabolizmasının dengelenmesinde, fizyolojik ritimlerin korunmasında, serbest radikallerin uzaklaştırılmasında ve bağışıklık sisteminin güçlendirilmesinde temel bir rol üstlenmektedir. Yapılan araştırmalar, gece vardiyasında çalışan bireylerde melatonin üretiminin azalmasına bağlı olarak bağışıklık fonksiyonlarında gerileme olduğunu ve bu kişilerde kanser gelişim riskinin daha yüksek olabileceğini göstermiştir (Claustrat et al., 1995; Garaulet et al., 2020).

Bu kitap bölümünün temel amacı, melatoninin bilinen tüm fonksiyonel özellikleri doğrultusunda insan, hayvan ve bitki metabolizması üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir.

2. İNSAN VE HAYVAN FİZYOLOJİSİNDE MELATONİNİN ÖNEMİ

2.1. Melatoninin İşlevleri

Melatonin, organizmada çok yönlü biyolojik etkiler gösteren temel bir moleküldür. Antioksidan özellikleri ile hücrel oksidatif stresi azaltırken, metabolizmanın düzenlenmesine ve enerji üretim süreçlerinin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bağışıklık ve savunma sistemini güçlendiren, sinir sistemini ve melanogenez süreçlerini düzenleyen, anti-inflamatuar ve biyoenerjetik işlevler üstlenmektedir. Melatonin ayrıca, uyku düzeninin sağlanmasında, sirkadiyen ritmin aktivasyonunda ve onkostatik etkilerle tümör gelişiminin önlenmesinde kritik bir rolü bulunmaktadır (Yılmaz and Gökmen, 2020; Kleszczyński et al., 2020). Bütün bunlara ek olarak melatonin, kardiyoprotektif özellikler göstererek kardiyolojik yaşlanmayı

yavaşlatmakta ve çeşitli kardiyovasküler hastalıklara karşı koruyucu bir etki sağlamaktadır (Favero et al., 2017; Salehi et al., 2019). Yine insan ruh hali üzerinde düzenleyici etkileri olduğu kadar uyku-uyanıklık döngüsü, üreme fonksiyonları ve kaygı seviyelerinin modüle edilmesi ve bağışıklık sisteminin güçlendirilmesinde de etkileri bulunmaktadır (Nabavi et al., 2019).

Melatonin hem lipofilik hem de hidrofilik özellikler gösteren bir moleküldür ve vücutta depolanmadan hızla kana ve diğer vücut sıvılarına dağılmaktadır. Su ve lipid fazlarda çözünme yeteneği sayesinde tüm hücresel bileşenlere kolayca geçiş yapabilmekte ve böylece hücre zarları, organeller ve çekirdek dahil olmak üzere yapıları serbest radikal kaynaklı hasarlara karşı etkili biçimde korumaktadır (Karunanithi et al., 2014; Öztürk et al., 2020). Kandaki melatoninin yaklaşık %70'inin albümine bağlı olduğu ve metabolizmasının öncelikli olarak karaciğerde, ikincil olarak böbreklerde gerçekleştiği bilinmektedir. Bu metabolik süreçte melatonin, 6-hidroksi melatonin sülfat ve 6-hidroksi melatonin glukuronid gibi bileşiklere dönüştürülmekte ve idrar yoluyla organizmadan atılmaktadır (Reiter, 1991; Brzezinski, 1997).

Melatonin, bitkilerde ise, büyüme ve gelişme düzenleyicisi olarak dikkate değer bir önemi bulunmaktadır. Bitkiler üzerinde çevresel faktörlere karşı toleransı artırma, klorofili koruma ve kök yenilenmesini destekleme gibi önemli fonksiyonları vardır (Yakupoğlu vd., 2018). Melatonin, abiyotik stres (tuzluluk, kuraklık, ani sıcaklık değişiklikleri, yoğun UV radyasyonu ve toksik kimyasallar) ve biyotik streslere (mikrobiyal enfeksiyonlar) karşı da bir antistres ajanı olarak etki ettiği belirlenmiştir. Melatonin yine bitki büyümesi ve fotosentezde de rol oynadığı ortaya konulmuştur (Nabavi et al., 2019).

2.2. Melatonin Sentezi ve Salınımını Etkileyen Faktörler

Melatonin sentezi ve salınımını etkileyen birçok faktör bulunmasına rağmen, en belirleyici etmen ışık uyarısıdır. Bu hormon, adeta bir karanlık-ışık sensörü gibi işlev görerek gece-gündüz döngüsünün düzenlenmesini kontrol etmektedir. Bu düzenleme mekanizması, literatürde “fotonöroendokrin kontrol” olarak adlandırılmaktadır. Işık, pineal melatonin üretiminde sirkadiyen ritmin senkronizasyonunu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda melatonin sentezini akut olarak baskılayabilir. Özellikle geceleri gözlerin yapay ışığa maruz kalması, melatonin salınımında hızlı ve belirgin bir düşüşe yol açabilmektedir. Ayrıca ışığın yoğunluğu, hormonun baskılanma derecesini belirleyen kritik bir parametre olup, ışık şiddeti arttıkça melatonin üretimi üzerindeki inhibisyon da güçlenmektedir (Koçak ve Çolak, 1996; Brainard et al., 1997; Atasoy, 2019).

2.3. Melatonin Biyosentezi ve Kaynakları

Melatonin, dolaşımdan alınan triptofandan sentezlenmekte ve serotonin oluşmaktadır. Serotonin ise iki enzimin ardışık aktivitelerini içeren iki

aşamalı bir süreçte melatonine dönüştürülmektedir. Melatonin sentezi için sınırlayıcı enzim olan serotonin-N-asetil transferaz (NAT) ve hidroksiindol-O-metil transferaz (HIOMT)'dir. Bu enzimleri kodlayan mRNA'lar, epifiz bölgesinde gündüz/gece ritminde görev almaktadır (Bernard et al., 1999). Hava karardığında, retinadaki fotoreseptörler uyarılmakta ve bu bilgi, monosinaptik retino-hipotalamik yol aracılığıyla hipotalamustaki suprakiazmatik çekirdeğe (SCN) iletilmektedir. Bu sistem, otonom, merkezi ve sirkadiyen olarak çalışmaktadır. Buraya ulaşan uyarılar daha sonra paraventriküler çekirdeğe (PVN) geçmekte ve oradan medial ön beyin sapı ve retiküler formasyonda birleşerek omuriliğin intermediolateral çekirdeğine gitmektedir. Sempatik sinir sisteminin preganglionik adrenerjik sinirleri tarafından alınan sinyaller ise, üst servikal gangliyon (SCG) taşınmaktadır. Üst servikal gangliyon kaynaklanan son sempatik bilgi epifiz bezine ulaşmaktadır. Sempatik sinirler, epifiz bezinin parankimal hücrelerinin terminallerindeki günlük ışık-karanlık değişimlerine göre ritmik olarak norepinefrinde salgılamaktadır. Bu madde, epifiz bezi zarındaki β -adrenerjik reseptörler tarafından tanınmakta ve buna bağlı olarak siklik nükleotid sistemi uyarılmaktadır (Bolliet et al., 1996; Ekmekcioglu, 2006; Şahin, 2014). Memelilerde epifiz bezi, elektriksel sinir uyarılarını hormonal çıktılara dönüştüren temel bir nöroendokrin dönüştürücü olarak işlev görmektedir. Melatoninin biyosentezi ve salınımı ışığa duyarlı olduğundan, hormonun plazma düzeyleri gece döneminde belirgin biçimde yükselmektedir. Karanlık koşullarda üst servikal gangliyon gelen β -adrenerjik postganglionik sempatik lifler aracılığıyla iletilen sinyaller melatonin üretimini uyarırken; aydınlıkta bu süreç baskılanmakta ve hormon sentezi belirgin ölçüde azalmaktadır (Koçak ve Çolak, 1996; Lee, 1996; Şahin, 2014).

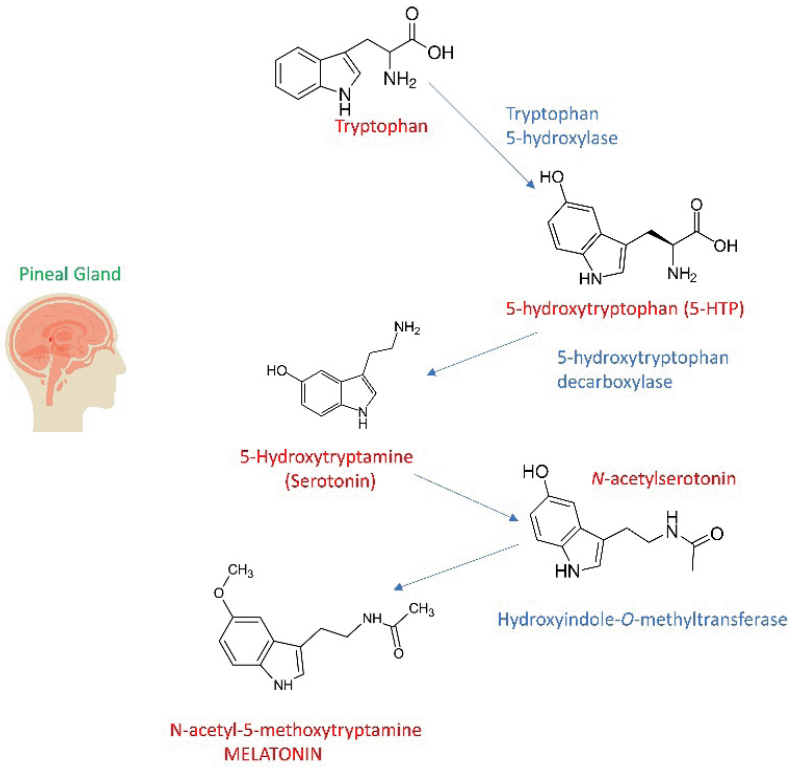
Melatonin, hayvan hücrelerinde biyolojik etkilerini büyük ölçüde hücre membranında bulunan G proteinine bağlı reseptörler (GPCR) aracılığıyla gerçekleştirmektedir (Jockers et al., 2016). Memelilerde melatonine duyarlı üç reseptör tipi tanımlanmıştır: MT1, MT2 ve MT3 olarak adlandırılan bu reseptörler, hormonun hücresel yanıtlarını düzenleyen temel nükleer hedefler olarak kabul edilmektedir (Reppert et al., 1995; Nosjean et al., 2000).

Melatonin reseptörleri, beyinden kardiyovasküler yapılara kadar çok çeşitli dokularda geniş bir dağılım göstermektedir. Bu reseptörler; beyin dokusu, kardiyovasküler sistem, aort, kalp ventrikül duvarı, serebral ve koroner arterler, safra kesesi, karaciğer, retina, parotis bezi, apendiks, çekum, kolon, deri, pankreas, trombositler ve bağışıklık sistemi hücrelerinde yer almaktadır (Uz ve Arslan, 2005; Hardeland, 2011). Melatonin reseptörlerinin en yoğun bulunduğu bölgeler ise genellikle gastrointestinal sistemin ince bağırsak ve kolon mukozasıdır (Bolliet et al., 1996).

Melatoninin biyolojik etkileri, çeşitli moleküler yolların etkinleşmesiyle ortaya çıkmakta olup, bu süreçte en iyi tanımlanmış mekanizmalar öz-

gül membran reseptörlerinin aktivasyonuna dayanmaktadır. Bu reseptörler yüksek afinite gösteren ML1 bölgesi ile daha düşük afiniteli ML2 bölgesini içermekte ve melatonin yanıtının büyük bir kısmını bu reseptörlerin uyarılması aracılığıyla düzenlenmektedir (Morgan et al., 1994; Dubocovich 1995). ML1 bölgesi, melatoninin hedef hücrelerdeki etkilerini doğrudan ya da G proteinine bağlı reseptörler aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Melatonin sinyal iletiminde üç temel reseptör tipi tanımlanmıştır ki bunlar; MT1, MT2 ve MT3'dür. MT1 ve MT2 reseptörleri G-protein aracılı mekanizmalarla işlev görmektedir olup, MT1 reseptörü melatonine daha yüksek bir afinite gösterirken; MT2 reseptörü daha düşük bir afiniteyle bağlanmaktadır. (Li et al., 2013). Kinon redüktaz ailesine ait olan üçüncü reseptör tipi MT3 proteini'dir. MT1 reseptörlerinin hipofiz bezinin pars tuberalis bölgesinde yoğunlaştığı, MT2 reseptörlerinin ise özellikle retinada bulunduğu bilinmektedir. Ayrıca her iki reseptör tipi de hipotalamustaki suprakiazmatik çekirdekte yer almaktadır. MT3 reseptörünün varlığı amfibilerde ve kuşlarda da ortaya konmuştur. Sirkadiyen ritmin ve üreme süreçlerine ilişkin etkilerin büyük ölçüde MT1 reseptörü üzerinden düzenlendiği, MT2 reseptörünün ise beyin ve retina bölgelerindeki dopaminerjik mekanizmalarla ilişkili olduğu düşünülmektedir (Reppert et al., 1995, Nosjean et al., 2000; Slaugenhaupt et al., 1995; Witt-Enderby et al., 2003).

Şekil 2'den görüldüğü üzere, melatonin biyosentezinin başlangıç basamağında yer alan triptofan, epifiz bezi tarafından plazmadan alınan temel bir öncü amino asittir. Besinlerle dışarıdan alınması gereken esansiyel bir amino asit olan triptofan, triptofan hidroksilaz enziminin katalizlediği reaksiyon sonucunda 5-hidroksitriptofana dönüştürülmektedir (Şekil 2). Bu reaksiyon basamağında B6 vitamini de bir koenzim olarak görev yapmaktadır. Oluşan 5-hidroksitriptofan, doğal bir ara metabolit olup kan-beyin bariyerini kolaylıkla geçebilmektedir. Bu bileşik, L-amino asit dekarboksilaz enziminin etkisiyle karboksil grubunu kaybederek serotonine dönüşmekte; ancak serotonin kan-beyin bariyerini geçememektedir. Serotonin ise, daha sonra N-asetiltransferaz (NAT) enzimi tarafından asetillenerek N-asetilserotonine çevrilmektedir ve son basamakta da N-asetilserotonin, hidroksiindol-O-metil transferaz enziminin katalizlediği reaksiyonla melatonine dönüştürülmektedir (Şekil 2) (Reiter, 1991; Atasoy, 2019; Nabavi et al., 2019).



Şekil 2. Melatonin biyosentez yolu (Özçelik vd. 2013)

Melatonin, hücre zarlarından geçişini kolaylaştıran yüksek lipid ve suda çözünürlüğe sahiptir. Dolaşıma salındıktan sonra çeşitli sıvılara, dokulara ve hücre bölmelerine (tükürük, idrar, beyin omurilik sıvısı, yumurtlama öncesi folikül, semen, amniyotik sıvı ve süt) ulaşmaktadır. Melatonin epifiz bezinde depolanmadığından, plazma hormon profili epifiz aktivitesini güvenilir bir şekilde yansıtmaktadır (Reiter, 1991). İnsanlarda melatonin salınımı, hava karardıktan hemen sonra (20:00-23:00) başlamakta, gecenin ortasında (02:00-04:00) en yüksek seviyeye ulaşmakta ve sabah saatlerinde (07:00-09:00) sona ermektedir. Gece döneminde ise kan ve dokulardaki melatonin konsantrasyonu gündüze kıyasla 3-10 kat daha yüksek seviyeye ulaşmaktadır (Atasoy, 2019). Genel olarak, genç yetişkinlerde gece melatonin üretimi tipik olarak 10–80 pg/mL aralığında değişim göstermektedir (Burgess and Fogg, 2008; Peuhkuri et al., 2012).

Serumdaki melatonin düzeyleri yaşa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yenidoğanlarda melatonin seviyeleri oldukça düşük olup, üçüncü aydan itibaren salgı ritmik bir düzen kazanmaktadır. En yüksek melatonin konsantrasyonları yaşamın üçüncü ile beşinci yılları arasında gözlenmekte ve yaş ilerledikçe melatonin üretimi belirgin şekilde azalmaktadır (Molina-Carballo et al., 1996; Waldhauser et al., 1998).

Melatonin birçok besin kaynağında bulunmakla birlikte, içeriği besinler arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Diyet yoluyla dışarıdan (ekzojen) sağlanan melatoninin en zengin kaynakları arasında yumurta, balık, mantar, arpa, yulaf, filizlenmiş tohumlar, kuruyemişler ve bazı tıbbi bitkiler yer almaktadır (Ahmad et al., 2019). Araştırmalar, bitkilerin tohum, kök, yaprak ve meyve kısımlarının melatonin açısından zengin kaynaklar olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bitkilerdeki melatonin düzeyleri bitki türü, iklim koşulları, tarımsal uygulamalar ile işleme ve depolama koşullarına bağlı olarak da önemli ölçüde değişiklikler göstermektedir (Nabavi et al., 2019).

2.4. Melatonin Sentez Merkezleri

Melatonin, epifiz bezi, yumurtalık ve kemik iliği hücrelerinin yanı sıra memelilerin safra ve gastrointestinal sistemlerinden de salgılanan önemli bir hormondur (Ustundag et al., 2020). Epifiz bezi, dolaşımdaki melatoninin yaklaşık %80'lik kısmının üretiminden sorumludur. Çeşitli türlerde gastrointestinal sistem, epifiz bezine ek olarak melatoninin temel kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Gastrointestinal sistemde, özellikle enterokromafin hücrelerinde sentezlenen melatonin, kuşlarda belirgin bir günlük ritim sergilerken, diğer birçok türde salınımı beslenme koşulları ve diyet faktörlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Martin et al., 1998).

Retinada sentezlenen melatonin, retina pigment epitelinin işlevlerinin düzenlenmesinde ve fotoreseptörlerin gündüz-gece döngüsüne verdiği yanıtın kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Ciltte ise, derin dokuların güneşin zararlı ışınlarına karşı korunmasını sağlamaktadır. Gastrointestinal sistemde melatonin, enterokromafin hücrelerinde sentezlenmekte ve özellikle yemek sonrası dolaşıma salınmaktadır. Safrada sentezlenen melatonin ise, safra yollarının mukoza ve epitelini oksitlenmiş kolesterol türevleri, safra asidi ve diğer oksidatif etkilere karşı korumaktadır. Bununla birlikte, safrada üretilen melatonin miktarı, kan dolaşımındaki toplam melatonin seviyesine önemli bir katkı sağlamamaktadır.

(Reiter, 1991; Özçelik vd. 2013; Şahin, 2014).

2.5. Melatoninin Fizyolojik Fonksiyonlar Üzerindeki Etkileri

2.5.1. Lenfoid Dokular Üzerindeki Etkisi

Melatonin, memelilerde timus ve dalak gibi bağışıklık fonksiyonuyla doğrudan ilişkili organların boyutunu artırıcı etkiye sahiptir. Epifiz bezinin cerrahi olarak çıkarıldığı veya epifiz fonksiyonunu baskılayan ilaçların uygulandığı deneysel hayvan modellerinde timus bezinde atrofi gözlenmiş olup, buna karşın dışarıdan melatonin verildiğinde ise timus bezinde belirgin hiperplazinin meydana geldiği bildirilmiştir. Öte yandan, kuşlarda yapılan araştırmalarda ise, melatoninin dalak ve Fabricius bursasının kütlesini azalttığı saptanmıştır. Bu farklılığın, memelilerdeki timus hormonlarının kuşlar-

daki karşılıklarından yapısal ve işlevsel olarak farklı olmasından kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Maestroni et al., 1987).

2.5.2. Melatoninin Sindirim Sistemi Üzerindeki Etkisi

Genel olarak, epifiz bezinden salgılanan melatoninin gastrointestinal sistemdeki konsantrasyonunun, kan dolaşımındaki düzeylere kıyasla 10–100 kat daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, sindirim sisteminin farklı bölge-lerinde melatonin seviyelerinin değişiklik gösterdiği ve bu lokal melatonin düzeylerinin serotonin konsantrasyonu ile doğrudan ilişkili olduğu yapılan araştırmalarla ortaya konmuştur (Bubenik, 2001).

2.5.3. Melatoninin Kardiyovasküler Sistem Üzerindeki Etkisi

Melatoninin kardiyovasküler sistem üzerindeki etkisi, reseptör aracılı ve reseptör aracısız olmak üzere iki farklı mekanizma üzerinden gerçekleşmektedir. Melatonin, serebral arterlerde vazokonstriksiyona yol açarken, periferik damar yataklarında vazodilatasyonu tetiklemektedir. Ayrıca, miyokard enfarktüsü geçirmiş veya ani ölüm riski taşıyan koroner kalp hastalarında melatonin düzeylerinin düşük olduğu bildirilmiştir (Sewerynek, 2002; Jockers et al., 2016).

Benzer biçimde, yüksek LDL kolesterol düzeyine sahip bireylerde ve hipertansif hastalarda da melatonin seviyelerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Melatoninin vazodilatör etkisi, termoregülasyon yoluyla uyku oluşumunu desteklemede önemli bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir (Paulis and Simko, 2007).

2.5.4. Günlük ve Yıllık Ritimlerin Düzenlemesi ile Fotoperiyodik Tepki

Melatoninin hem hayvanlarda hem de insanlarda fotoperiyodik ve sirkadiyen ritimlerin düzenlenmesinde temel bir düzenleyici olarak işlev gördüğü bildirilmektedir. Kandaki melatonin düzeylerindeki ritmik değişimlerin, dokuların ve hücrelerin günün ya da yılın zamanını algılamasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca dışarıdan uygulanan melatonin, organizmada fizyolojik olarak karanlık dönemde gerçekleşen melatonin salınımını taklit ederek benzer bir etki oluşturmaktadır (Reiter, 1991).

Sirkadiyen ritim veya biyolojik saat olarak adlandırılan sirkadiyen saat, bakteriler ve mantarlardan başlayarak bitki ve hayvanlara kadar çok geniş bir canlı grubunda fizyolojik, davranışsal ve metabolik süreçleri düzenleyen bir zamanlama mekanizması olarak görev yapmaktadır. Bu sistem, Dünya'nın kendi eksenini etrafındaki dönüş süresine uyumlu olarak yaklaşık 24 saatlik döngüler şeklinde işlev göstermektedir. Hücreler ve organizmalar, iç biyolojik saatlerinin yönlendirdiği zamanlama mekanizmalarına göre günün farklı dönemlerine özgü tepkiler vermektedir. Bu sayede hücre yenilenmesi, hormon salgılanması gibi temel fizyolojik süreçler düzenlenmektedir. Bitkilerde

ise fotosentez, çiçeklenme ve gelişimsel döngüler gibi olaylar bu iç saat aracılığıyla kontrol edilmektedir. Bazı araştırmalar, melatoninin bitkilerde sirkadiyen ritmin yanı sıra gen ekspresyonu, metabolit düzeyleri, protein stabilitesi ile günlük ve mevsimsel döngüler dahil pek çok biyolojik sürecin düzenlenmesinde rol oynadığını göstermiştir. Ayrıca melatoninin fotosentez ve büyümeyi desteklediği, çiçeklenme zamanlamasını etkileyerek tohum verimini artırabildiği, biyotik ve abiyotik stres yanıtlarını modüle edebildiği de ortaya konmuştur (Atkins and Dodd, 2014; Buttar et al., 2020). Araştırmalar, melatonin düzeylerinin türe bağlı olarak değişiklik gösterdiğini, özellikle gece ya da karanlık koşullar altında belirgin biçimde arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca bazı bitki türlerinde melatonin miktarının gün içinde ikinci bir zirve noktasına ulaştığı da tespit edilmiştir (Kolář et al., 1997).

Melatoninin bitkilerde 24 saatlik döngülerin düzenlenmesinde görev alan bir ritim belirleyicisi olduğu ve sentez düzeylerinin genellikle karanlık dönemde arttığı saptanmıştır. Ancak bazı araştırmacılar, melatonin üretiminin en yüksek seviyesine gün batımından hemen önce ulaştığını da tespit etmişlerdir (Wolf et al., 2001; Reiter et al., 2007; Zuo et al., 2014). Bazı araştırmalar, melatoninin bitkilerde sürekli olarak bulunduğunu ve gün boyunca düzeylerinde belirgin dalgalanmalar gösterdiğini ortaya koymuştur (Reiter et al., 2009). Örneğin, su sümbülü üzerinde gerçekleştirilen bir çalışma, doğal koşullarda yetişen bitkilerde melatonin düzeylerinin, hayvanlarda gözlenen ritmin aksine, ışık döneminin sonuna doğru yükseldiğini göstermiştir. Bu artışın, fotosentez süreçleri ve bitkinin yoğun ışığa karşı korunma mekanizmalarıyla ilişkili olabileceği öne sürülmüştür (Reiter et al., 2007). Elmalardaki melatonin değişimini gün içinde inceleyen başka bir çalışmada ise, yapraklardaki melatonin seviyesinin gün içinde iki kez, 14:30 ve 05:30'da zirve yaptığını ortaya koymuştur (Zuo et al., 2014).

2.5.5. Melatoninin yaşlanma üzerindeki etkisi

Melatoninin hayvan modellerinde yaşlanmaya bağlı ortaya çıkan çeşitli bozuklukları önleyici etkilere sahip olduğu ve genetik özelliklere bağlı olarak bazı memeli türlerinde yaşam süresini belirli ölçüde uzatabildiği ortaya konmuştur (Hardeland and Poeggeler 2012). Bitkilerde yaşlanma süreçlerini inceleyen araştırmalarda, odak genellikle organizmanın tamamı yerine yapraklardaki yaşlanma belirtilerine yöneliktir; bu nedenle bitkilerdeki yaşlanma mekanizması, hayvanlarda gözlenen sistemik yaşlanmadan farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, her iki grupta da ortak bir özellik olarak, yaşlanmanın ilerlemesiyle hücrelerde oksidatif stresin yol açtığı hasarın arttığı görülmektedir. Bu bağlamda, melatoninin güçlü antioksidan özellikleri hem bitkilerde hem de hayvanlarda yaşlanma sürecinin yavaşlatılmasına katkıda bulunan önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir (Hardeland, 2013).

2.5.6. Melatoninin Bağışıklık Sistemi ve Kansere Üzerindeki Etkisi

Melatonin, güçlü bir serbest radikal temizleyici özelliğe sahip olmasının yanı sıra, nitrik oksit sentaz enzim aktivitesini inhibe ederek de antioksidan etki göstermektedir (Reiter et al., 2000a; Reiter et al., 2007). Buna ek olarak, melatoninin yanık hasarı, sepsis ve iskemi-reperfüzyon hasarı gibi inflamasyon durumlarında dokularda nötrofil aktivasyonu sonucu oluşan oksidatif hasarı da önleyebilmektedir (Reiter et al., 2000). Melatoninin bağışıklık sistemi üzerindeki bir diğer önemli etkisi de, anti-inflamatuar özellikleridir. Bazı araştırmalar, melatoninin HIV, bakteriyel enfeksiyonlar ve kanser gibi bulaşıcı veya patojen kaynaklı hastalıklar üzerinde de potansiyel olarak etkili olabileceğini öne sürmektedir (Maestroni 1999).

Melatonin, bağışıklık sistemi hücrelerinin hem günlük hem de mevsimsel ritimlerine bağlı düzenlenmesinde de önemli bir rol oynamaktadır (Simonneaux and Ribelayga 2003). Yapılan in vivo çalışmalarda, yüksek doz melatoninin genel bağışıklık sistemi üzerinde uyarıcı etkiler sağladığı saptanmıştır. Melatonin uygulamasının T hücrelerinin aktivasyonunu artırdığı, lenfosit proliferasyonunu desteklediği, humoral yanıtı güçlendirdiği ve yaşlanmayla birlikte ortaya çıkan timus involüsyonunu engellediği belirlenmiştir (Simonneaux and Ribelayga 2003). İn vitro çalışmalarda ise, melatoninin insan monositlerinde yardımcı T hücresi ve doğal öldürücü (NK) hücre aktivitelerini artırdığı, IL-2 ve IFN- γ üretimini desteklediği ve IL-1 mRNA ekspresyonunu yükselttiği gösterilmiştir. Ayrıca, viral enfeksiyon tedavileri sırasında yaşanan çaresizlik göz önüne alındığında, melatoninin birçok viral enfeksiyonda tedaviye destekleyici etkiler sağlayabileceği de öne sürülmüştür (Simonneaux and Ribelayga 2003; Gümüşova and Memiş 2014).

Yapılan çalışmalar, MT1 melatonin reseptörlerinin meme ve prostat kanseri hücrelerinde sürekli olarak aktif olduğunu ve bu durumun kanser hücrelerinin proliferasyonunu engellediğini göstermiştir (Liu et al., 2016). Son yıllarda, melatoninin kanser üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmaların büyük bir kısmı özellikle meme kanserine odaklanmıştır. Elde edilen bulgular, melatoninin gece saatlerinde uygulanmasının kanser tedavisinde daha etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir (Hotchkiss and Nelson, 2002; Reiter et al., 2009). Mevsimsel değişimlerin kanser gelişimi üzerindeki etkisi, melatoninin düzeyleriyle yakından ilişkilidir. Özellikle gecelerin uzun olduğu kış aylarında melatonin üretimi artmakta ve bu dönemde tümör progresyonunun yavaşlamaktadır (Lissoni et al., 1995).

Melatonin, kanser hücrelerinin büyümesi için gerekli olan linoleik asidin hücreye girişini sağlayan reseptörlerin sayısını azaltarak doğrudan antikarsinogenik etki göstermektedir. Ayrıca, Ca^{2+} -kalmodulin kompleksi aracılığıyla kanser hücrelerini uyku durumuna geçirerek tümör ilerlemesini yavaşlatmaktadır (Maestroni 1999; Reiter et al., 2009; Topal et al., 2009).

2.5.7. Melatoninin Serbest Radikal Temizleyici ve Antioksidan Etkisi

Dünya atmosferinin yaklaşık %21'ini oluşturan oksijen, aerobik organizmaların yaşamını sürdürebilmesi için hayati öneme sahiptir. Solunan oksijenin büyük bir kısmı ATP sentezi için kullanılırken, yaklaşık %5'lik bir bölüm son derece reaktif ve toksik serbest radikallere dönüşmektedir. Melatonin, özellikle hidroksil ve peroksil radikallerinin etkili bir temizleyicisi olarak işlev görmektedir. Bununla birlikte, peroksil radikalini nötralize etme kapasitesi E vitaminine kıyasla daha düşük olduğundan, lipoperoksil radikale karşı sınırlı bir etkisi bulunmaktadır (Escames et al., 1997; Reiter et al., 2000a). Bunun temel nedeni, mitokondrideki oksidatif fosforilasyon ve peroksizomlarda gerçekleşen yağ asidi oksidasyonu sırasında serbest radikallerin oluşmasıdır. Bu serbest radikaller; hidroksil radikalleri ($\cdot\text{OH}$), hidrojen peroksit (H_2O_2), süperoksit anyon radikalleri ($\text{O}_2^{\cdot-}$) ve singlet oksijen ($^1\text{O}_2$) gibi yüksek toksisiteye sahip moleküller olarak sınıflandırılmaktadır (Touitou, 2001; Salt et al., 2017).

Melatonin, en zararlı radikal olan hidroksili etkisiz hâle getirerek lipit peroksidasyonunu önleyen güçlü bir antioksidan olarak tanımlanmaktadır (Salt et al., 2017). Melatoninin serbest radikaller üzerinde dolaylı etkilerde göstermektedir. Melatonin, hidroperoksitlerin metabolizmasında görev alan glutatyon peroksidaz (GSH-Px) enzimini aktive etmekte, süperoksit anyon radikalini ($\text{O}_2^{\cdot-}$) hidrojen peroksit (H_2O_2) dönüştüren süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesini artırmakta, oksidatif stres sırasında katalaz aktivitesindeki düşüşü önlemekte ve nitrik oksit (NO) üretiminden sorumlu olan nitrik oksit sentaz (NOS) enzimini inhibe ederek antioksidan etki göstermektedir (Reiter, 1991; Reiter et al., 2000a; Reiter et al., 2000b).

Oksidatif doku hasarına yol açan bazı toksinlerin neden olduğu stres, melatonin aracılığıyla önlenabilmektedir. Melatonin hem sulu hem de lipit ortamda çözünbildiği için hücre içindeki tüm bileşenlere kolayca ulaşmakta ve hücre zarını, organelleri ile çekirdeği serbest radikal kaynaklı hasarlardan etkin bir şekilde korumaktadır. Bu koruma, melatoninin hücre zarının dış yüzeyine bağlanması, radikalleri zar içine girmeden önce yakalaması ve detoksifiye etmesi yoluyla gerçekleşmektedir (Reiter, 1993).

2.5.8. Melatoninin Uyku Üzerindeki Etkisi

Melatonin, endojen bir düzenleyici olarak organizmada homeostazın sürdürülmesine katkı sağlamakta ve suprakiazmatik çekirdekten (SCN) gelen sinyaller aracılığıyla, günlük, aylık ve yıllık salınım farklılıklarına sahip tüm hücrelere bilgi akışını düzenlemektedir. Ayrıca, hücrelerdeki saat genlerinin ekspresyonunu epigenetik mekanizmalar yoluyla kontrol etmektedir (Claustrat et al., 1995; Topal et al., 2009).

Melatoninin uyku üzerindeki etkilerinin büyük olasılıkla kronobiyolojik mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Melatonin salınımının uykuya olan etkisi, toplam uyku süresinden ziyade uykunun başlangıcı, kalitesi ve latent fazı ile ilişkilidir; bu etkinin hipotermik etkiler ve termoregülasyon yoluyla sağlandığı düşünülmektedir. Melatonin ayrıca, gece sıcaklık düşüşünü artırarak uykuya dalmayı kolaylaştırmaktadır (Claustrat et al., 1995). Salınımının tetiklenmesi için uykuya gerek olmamakta, yalnızca karanlık ortam yeterli olmaktadır. Öte yandan uyku, insanlar için hayati öneme sahiptir ve düzenlenmesindeki temel mekanizma, aydınlık-karanlık döngüsüdür. Işığa maruz kalmak, retinadan hipotalamusun ilgili bölgelerine uzanan sinir yollarını uyarmaktadır. Hipotalamik yapıda yer alan suprakiazmatik çekirdek (SCN), hormonları, vücut sıcaklığını ve uyku-uyanıklık hissini kontrol eden sinyalleri beyin diğer bölgelerine ileterek vücudun biyolojik saatini düzenleyen merkezi bir mekanizma görevi görmektedir (Garfinkel et al., 1995; Macchi and Bruce, 2004).

Gün boyunca epifiz bezinin nispeten inaktif olması nedeniyle, uyku ile ilişkili melatonin benzeri hormonların salınımı baskılanmaktadır. Güneş ışığı azaldığında, suprakiazmatik çekirdek (SCN) tarafından melatonin salınımını inhibe eden baskılayıcı sinyaller ortadan kalkmakta ve epifiz bezi uyarılarak melatonin üretimi başlamaktadır. Melatonin düzeyleri yükseldikçe uyarı algısı azalmakta ve uyku hissi güçlenmektedir. Melatoninin toplam uyku süresinden ziyade uykunun başlangıcı, latent fazı ve kalitesi ile daha güçlü bir ilişki göstermektedir (Arendt, 2000).

2.5.9. Melatoninin Üreme Sistemi ve Diğer Hormonlarla İlişkisi

Dışarıdan verilen melatonin, üreme süreçleri üzerinde düzenleyici bir rol oynamaktadır; ancak bu düzenleyici etkinin düzeyi, tür, yaş, uygulanan doz ve uygulama zamanı gibi çeşitli değişkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Salt et al., 2017). Melatoninin üreme fizyolojisi üzerinde belirgin etkiler gösterdiği bilinmektedir ve bunun hipotalamus-hipofiz-gonad ekseninde baskılayıcı bir etki oluşturabileceği yönünde görüşler bulunmaktadır (Baltacı, 2001). Yine melatoninin antigonadotropik etkilere de sahip olduğu tespit edilmiştir. Yetişkin dişi bireylerde uzun süreli melatonin salgısının, yumurtalık hacmini küçülttüğü ve östrus döngüsünün sıklığını azalttığı gözlemlenmiştir (Wurtman et al., 1963). Yüksek dozda melatonin uygulamasının, gonadotropin düzeylerini düşürürken prolaktin ve büyüme hormonu seviyelerini artırdığı ve mevsimsel üremeye sahip hayvanlarda üreme aktivitelerini düzenlediği belirlenmiştir (Nagy et al., 2000). Melatoninin, kısa günlerde üreme aktivitesi gösteren koyun, keçi ve geyik gibi türlerde gonadlar üzerinde uyarıcı, uzun günlerde üreme aktivitesi sergileyen at, hamster ve deve gibi türlerde ise baskılayıcı etkiler gösterdiği bildirilmiştir (Uyar ve Alan, 2008).

Mevsimsel üreme gösteren hamsterlarda uzun süreli karanlık ortamın melatonin salgısını artırarak üremeyi baskıladığı, erkeklerde testis gerilemesine, dişilerde ise anöstrusa yol açtığı belirlenmiştir. Her ne kadar insanlar mevsimsel olarak üremese de epidemiyolojik araştırmalar gebelik ve doğum oranlarının farklı coğrafi bölgelerde mevsimsel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle uzun kışların görüldüğü bölgelerde, hipotalamo-gonadal sistem aktivitesinin etkisiyle gebelik oranlarının yaz aylarına kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Ölmez vd., 2000).

Epifiz bezi, hipofiz, tiroid, adrenal bezler ve gonadlar aracılığıyla vücuttaki endokrin fonksiyonları düzenleyen merkezi bir yapı olarak görev yapar. Bu nedenle, endokrin organlardaki işlev bozukluklarının yol açtığı durumlarla doğrudan ilişkili olduğu kabul edilmektedir (Atasoy ve Erbaş, 2017). Melatonin ve dolayısıyla epifiz bezinin, hipofiz aracılığıyla gonadotropik hormonlar ve diğer hormonların salgılanmasını etkilediği düşünülmektedir. Melatonin uygulamasının kadınlarda prolaktin salgısını artırdığı da saptanmıştır. Melatonin, yetişkin erkeklerde ise, bazal büyüme hormonu (GH) salgısını yükselttiği ve GHRH'nin (büyüme hormonu salgılatıcı hormon) GH üzerindeki uyarıcı etkisini güçlendirdiği ortaya konmuştur (Ninomiya et al., 2001; Turgut vd., 2003).

2.5.10. Melatoninin Yaşlanma Üzerindeki Etkisi

İnsanlarda plazma melatonin konsantrasyonunu, yaşla birlikte azalma göstermektedir. Yaşlanmayla birlikte ise, melatonin sentezi ve salınımında bir azalma olmakta ve buna paralel olarak, melatoninin salınımının sirkadiyen ritmi bozulmaktadır. Yaşlılarda ölçülen plazma melatonin konsantrasyonu, normal değerinden yaklaşık %40-50 daha düşük olmaktadır (Touitou, 2001; Atasoy ve Erbaş, 2017). Yaşlanma sürecinde organlarda ortaya çıkan anatomik ve fonksiyonel dejenerasyonun nedenleri arasında, antioksidan kapasitenin azalması ve serbest radikallerin yol açtığı hasar önemli bir yer tutmaktadır. Bu durumun, yaşla birlikte melatonin hormonunun düzeyinin düşmesiyle ilişkili olduğu bildirilmektedir (Mollaoğlu ve Özgüner, 2009).

Melatoninin, antioksidan enzimleri uyarma, lipid peroksidasyonunu azaltma ve beyin dokusunu oksidatif hasara karşı koruma gibi etkileri olduğu bilinmektedir. Çalışmalar, beyindeki nörodejeneratif hasarın başlıca nedenlerinden biri olarak, melatonin düzeylerindeki azalmaya bağlı olarak artan serbest radikalleri işaret etmektedir (Kerman et al., 2005).

Yaşlanma ile birlikte, önemli bir hidroksil radikal temizleyicisi olan melatonin düzeyinin azalması, beyin dokusunu oksidatif hasarlara karşı savunmasız bırakmaktadır. Yapılan çalışmalar, melatonin tedavisinin bu durumu önleyebileceğini göstermektedir (Kerman et al., 2005).

Yaşlanma sürecinde, pinealosit zarındaki β -adrenerjik reseptör sayısının

azalması, muhtemelen pineal bezde melatonin sentezinin düşmesine yol açmaktadır. Bilindiği gibi, β -adrenerjik reseptörler geceleri sempatik nöronlardan pineal beze norepinefrin salgılanmasını sağlayarak, melatonin sentezini artıran bir dizi biyokimyasal süreci başlatmaktadır (Touitou, 2001; Mollaoğlu ve Özgüner, 2009).

2.5.11. Melatoninin Jetlag Üzerindeki Etkisi

Transmeridyen yolculuklar, uyku düzeni, sirkadiyen ritim ve günlük aktiviteleri etkilemektedir (Srinivasan et al., 2008). Bilindiği üzere, uçuş ritmi bozukluğu (jetlag); gündüz yorgunluğu, uyanamama, gece uykusuzluğu, iştahsızlık, sindirim sorunları, depresif ruh hali, zayıf psikomotor koordinasyon ve bilişsel performansta düşüş gibi çeşitli semptomlarla kendini göstermektedir (Srinivasan et al., 2008).

2.5.12. Melatoninin insülin salgılanması üzerindeki etkisi

Melatoninin sirkadiyen ritminin insülin salgısını ve endokrin pankreas fonksiyonunu etkilediğine dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır (Peschke et al., 2007; Anonymous, 2024a). Sıçanlar üzerinde yapılan çalışmalar, melatoninin insülin düzeylerini düşürdüğünü ve bunun glikoz toleransındaki azalmayla uyumlu olduğunu, dolayısıyla epifiz bezinin β hücreleri üzerinde baskılayıcı bir etki oluşturduğunu göstermektedir (Wolden-Hanson et al., 2000; Cagnacci et al., 2001). Bu bulgular ve artan insülin seviyelerinin epifiz bezi ve melatonin üzerinde baskılayıcı etkisi olduğu bilgisi ışığında, insülin ve melatonin arasında fonksiyonel bir antagonizma bulunduğu öne sürülmektedir (Champane et al., 1985).

3. BİTKİLERDE MELATONİN ÖNEMİ

Bitkilerde melatonin araştırmaları, hayvanlardaki çalışmalara kıyasla daha kısa bir geçmişe sahiptir. Bununla birlikte, son dönemde bu alanda kayda değer ilerlemeler sağlanmıştır. Melatoninin oksidatif stresi hafifletme yeteneği sayesinde, özellikle bitkilerin vejetatif ve üreme evrelerinde birçok fizyolojik süreçte önemli roller üstlendiği ortaya konmuştur (Arnao and Hernández-Ruiz, 2014; Fan et al., 2018; Mukherjee, 2018). Melatoninin bitkilerde sirkadiyen ritim ve fotoperiyodik özellikleri düzenlediğine dair kanıtlar bulunmaktadır. Melatonin, gen ekspresyonunu, büyüme ve gelişmeyi düzenlemekte; bitkileri endojen ve ekzojen biyolojik stres faktörlerine karşı hazırlayarak korumakta; bitkilerin biyotik etmenlerle (örneğin otçullar ve zararlılar) olan etkileşimlerini yönlendirmekte ve özellikle yaprak yaşlanmasını yavaşlatarak yaşlanma sürecini düzenleyebilmektedir. Melatonin, bir indolamin nörotransmitter olarak işlev görmekte ve özellikle bitkilerde reaktif oksijen ve azot türlerini kontrol eden güçlü bir antioksidan ajan olarak görev yapmaktadır. Aynı zamanda bir sinyal molekülü olarak, fotosentez, büyüme, karbon fiksasyonu, köklenme, tohum çimlenmesi ve çeşitli biyotik ile abiyotik

stres faktörlerine karşı savunma mekanizmalarını artıran spesifik fizyolojik tepkileri tetikleyebilmektedir. Ayrıca melatonin, bitki hormonlarıyla ilişkili genlerin ifadesini düzenlemenin yanı sıra, indol-3-asetik asit, sitokinin, etilen, gibberellin ve oksin taşıyıcı proteinlerin metabolizmasında önemli bir modülatör olarak görev yapmaktadır. Bunun yanı sıra, strese özgü genlerin düzenlenmesini desteklemekte ve stres koşulları altında patojenezle ilişkili proteinler ile antioksidan enzim genlerinin aktivasyonunu sağlamaktadır (Arnao and Hernández-Ruiz, 2014; Fan et al., 2018; Mukherjee, 2018; Yu et al., 2018).

3.1. Bitkilerde Melatonin Oluşumu

Bitkilerde melatonin üretimi, hayvanlardaki sentez mekanizmalarından farklılık göstermektedir. Bitkilerde melatonin sentezi, özellikle ışık olmak üzere çeşitli çevresel ve fizyolojik faktörler tarafından düzenlenmektedir. Bitkilerde melatonin biyosentezinin başlıca gerçekleştiği organeller mitokondri ve kloroplastlardır. Bu organeller, melatonin üretiminde görev alan farklı enzim gruplarını içermektedir. Melatonin sentezi iki yönlü bir süreç olup, mitokondride üretim engellense dahi kloroplastlarda sentez yeniden başlatılabilmektedir. Bitkilerdeki bu sentezde özellikle M3H enzimi önemli bir rol oynamaktadır (Acharya et al., 2021).

Melatonin neredeyse tüm bitki türlerinde bulunmakla birlikte, düzeyi bitki dokusu ve ışık koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Aromatik bitkilerde ve yaprak dokularında melatonin konsantrasyonu, tohumlara kıyasla daha yüksek seviyelerde bulunmaktadır (Burkhardt et al., 2001; Murch et al., 2001).

Yüksek bitkilerde melatonin ilk olarak 1993 yılında sarmaşık, sabah sefası (*Pharbitis nil* L., syn. *Ipomoea nil* L.) ve domates meyvelerinde (*Solanum lycopersicum* L.) keşfedilmiştir (Van Tassel and O'Neill 2001; Sharif et al., 2018). Ayrıca, melatonin içerdığı tespit edilen bitkilerin büyük çoğunluğu Rosaceae, Vitaceae, Poaceae, Apiaceae ve Brassicaceae familyalarına ait olmakla birlikte, diğer bazı bitki türlerinde de yüksek endojen melatonin düzeyleri belirlenmiştir. Son on yıl içinde yapılan çalışmalar, melatonin konsantrasyonunun aynı türün farklı çeşitleri arasında; bitkinin konumu, gelişim aşaması, organ tipi ve hasat zamanına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymuştur (Burkhardt et al., 2001). Ayrıca, endojen melatoninin çeşitli bitki türlerinde büyüme ve gelişim süreçlerini düzenlemede önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir (Tan et al., 2013; Wei et al., 2018).

3.2. Yenilebilir Sebzelerde Melatonin İçeriği

Melatonin, yenilebilir bitkiler ve bitkisel kaynaklı gıdalar başta olmak üzere çeşitli besinlerde bulunabilmektedir. Bazı bitkiler ve gıda maddeleri yalnızca melatonin değil, aynı zamanda onun biyosentetik öncüllerini de

içermektedir. Biyoaktif bir molekül olarak melatonin; domates, çilek, üzüm, pirinç, ceviz, portakal, kiraz, zeytinyağı ve arpa gibi meyve, sebze ve bitkisel ürünlerde farklı bileşimler ve konsantrasyonlarla yer almaktadır. Bitkilerde melatoninin varlığı oldukça yaygındır; ancak bitki dokularındaki melatonin düzeyleri pikogramdan mikrograma kadar geniş bir aralıkta değişim gösterebilmektedir. Bitkisel melatonin, oksidatif stresi azaltmada kritik bir işlev üstlenmekte; tohum gelişimi ve çimlenmesini desteklemekte, stres toleransını artırmakta; bağışıklık yanıtını uyarmakta, sirkadiyen ritmin düzenlenmesine katkıda bulunmakta; yaprak stomalarının kapanmasını kontrol etmekte ve kuraklık, toksik kimyasal maruziyeti ile tuzluluk gibi çevresel zorluklara karşı bir anti-stres bileşeni olarak görev yapmaktadır. Ayrıca melatonin, antibakteriyel, antiviral ve antifungal özellikleri sayesinde bitkilerin biyotik stres etmenlerine karşı savunmasında da önemli bir rol oynamaktadır (Wei et al., 2018).

3.3. Bitkilerde Melatonin Alımı

Melatonin içeren bitkiler, bu indolamin bileşiğini kendi metabolik süreçleri aracılığıyla sentezleyebildikleri gibi, yetiştirme ortamına (örneğin toprağa) ya da doğrudan bitki dokularına (özellikle yapraklara) dışarıdan uygulanan melatonin de absorbe edebilmektedir (Reiter et al., 2000a; Reiter et al., 2000b). Yapılan araştırmalar, melatoninin yalnızca kökler aracılığıyla değil, aynı zamanda tohumlar ve yapraklar üzerinden de bitki tarafından alınabildiğini ortaya koymuştur. Nitekim, farklı melatonin derişimlerinin uygulandığı arpa yapraklarında, yapraklardaki melatonin düzeyinin uygulanan konsantrasyonla doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir (Arnao et al., 2009a).

3.4. Melatoninin Bitki Büyümesi ve Fizyolojik Süreçlerin Düzenlenmesindeki Rolü

Melatoninin bitkilerin genel büyüme ve gelişimini desteklediği bildirilmekle birlikte, bu molekülün temel işlevinin güçlü bir antioksidan olarak davranmak olduğu kabul edilmektedir. Hem suda hem de lipitlerde çözünebilirliği sayesinde melatonin, bitki dokuları içinde farklı hücresel bölmelere serbestçe taşınabilmekte ve bu özelliği aracılığıyla oksidatif stresin azaltılmasında önemli bir rol üstlenmektedir (Murch et al., 2001; Tan et al., 2013; Wei et al., 2018). Son yıllarda yürütülen araştırmalar, melatoninin bitkilerde büyüme ve gelişiminin düzenlenmesi, stres toleransının artırılması ve antioksidan savunmanın güçlendirilmesi gibi çeşitli fizyolojik süreçlerde önemli roller üstlendiğini göstermektedir. Melatonin, bahçe bitkilerinde tohum çimlenmesini, kök oluşumunu, sürgün gelişimini ve biyokütle birikimini destekleyebilmektedir. Bunun yanı sıra, vejetatif ve generatif gelişim evrelerinin, çiçeklenme geçişinin ve yaprak yaşlanma süreçlerinin düzenlenmesinde de kritik işlevler üstlenmektedir. Melatonin, kök mimarisini, besin alımını ve iyon taşınımını etkileyerek bitkilerin stres koşullarına dayanık-

lılığını artırmakta; reaktif oksijen türlerini nötralize etmesi ve antioksidan sistemleri güçlendirmesi sayesinde geniş etkili bir antioksidan olarak görev yapmaktadır (Arnao and Hernández-Ruiz, 2006; Ahmad et al., 2019).

Melatoninin benzer etkileri etiyole edilmiş *Lupinus albus* L. bitkilerinde de gözlenmiş; bu türde melatoninin vejetatif büyümeyi, yanal ve adventif köklerin rejenerasyonunu desteklediği ortaya konmuştur (Arnao ve Hernández-Ruiz, 2007). Salatalık bitkilerinde ise özellikle tuz stresi altında melatonin uygulamasını takiben fide gelişiminde artış, besin alım verimliliğinde iyileşme ve azot metabolizmasında belirgin bir yükseliş bildirilmiştir (Zhang et al., 2017). Bunun yanı sıra, melatonin uygulamasının arpa, buğday, kiraz ve pirinç gibi türlerde fotosentetik aktiviteyi artırdığı, redoks homeostazını güçlendirdiği, kök büyümesi ile gelişimini düzenlediği ve seminal kök uzamasını desteklediği rapor edilmiştir (Li et al., 2018). Genel olarak değerlendirildiğinde, melatonin bitkisel üretim kapasitesini artıran biyolojik bir büyüme düzenleyicisi olarak kabul edilebilmektedir.

3.4.1. Melatoninin Tohum Çimlenmesi Üzerindeki Etkisi

Başarılı bir çimlenme süreci ile sağlıklı fide oluşumu, bitki popülasyonlarının kuruluşundaki kritik iki aşamayı oluşturmaktadır. Doğal koşullar altında melatonin düzeyi, tohum çimlenmesinin erken evrelerinde hızla yükselmekte ve yaklaşık 14 saat içinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Ancak çimlenme ilerledikçe melatonin konsantrasyonu düşüş göstermekte ve fide gelişiminin daha ileri aşamalarında nispeten sabit bir düzeye erişmektedir. Sitoplazmadaki melatonin konsantrasyonunun başlangıçtaki artışı, besin maddelerinin çimlenen tohumların metabolik bölgesine taşınmasına katkıda bulunabilmektedir (Aguilera et al., 2015).

3.4.2. Melatoninin Fotosentez Üzerindeki Etkisi

Fotosentez, klorofil içeriğinin azalması, kloroplastlardaki eksitonların bozulması ve stomaların kapanması gibi etkiler oluşturan çeşitli biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı oldukça hassastır. Bununla birlikte, melatonin uygulamasının bu stres kaynaklı olumsuz etkilerin hafifletilmesinde önemli ölçüde yarar sağladığı bilinmektedir. Melatonin, klorofil bozunma hızını yavaşlatarak ve stoma iletkenliğini artırarak stomaların düzenli açılıp kapanmasını desteklemekte; böylece fotosistemlerin hücrel düzeydeki verimliliğini artırmaktadır. Bu durum, bitkilerde fotosentez hızının ve CO₂ asimilasyonunun yükselmesine, aynı zamanda antioksidan kapasitenin güçlenmesine katkı sağlamaktadır. Melatonin ayrıca, çeşitli abiyotik streslerin olumsuz etkilerini azaltmakta; kloroplast yapısını ve işlevini korumakta, şeker asimilasyonunu desteklemekte ve stres koşullarında normal hücrel fonksiyonların sürdürülebilmesi için prolin birikimini artırmaktadır (Arnao and Hernández-Ruiz, 2014; Arnao and Hernández-Ruiz, 2015a). Melatonin, fotosentez, karbon asimilasyonu ve askorbat biyosentezi ile ilişkili genlerin

ekspresyonunu artırmaktadır (Sarropoulou et al., 2012; Arnao ve Hernández-Ruiz, 2015b).

3.4.3. Melatoninin Bitkilerde Üreme Süreçleri ve Sirkadiyen Ritimlerinin Düzenlenmesindeki Rolü

Melatoninin bitkilerde keşfedilmesinin ardından, bu molekülün memelilerdeki işlevlerine benzer görevler üstlenebileceği düşünülmüştür. Bu nedenle, erken dönem çalışmalar melatoninin sirkadiyen ritimler üzerindeki etkileri ile çiçeklenme, fotoreseptör işleyişi, vernalizasyon süreçleri ve bitki hormonları gibi ilişkili biyolojik olgulardaki potansiyel rolünü araştırmaya yönelinmesini sağlamıştır (Murch et al., 2001; Arnao and Hernández-Ruiz, 2009; Zhang et al., 2017).

3.4.4. Melatoninin Antioksidan Savunma Sistemi Üzerindeki Etkisi

Melatoninin bitkilerde üstlendiği temel görev, güçlü bir antioksidan olarak işlev görmek ve farklı çevresel kirleticilere karşı savunma sağlamak şeklinde tanımlanmaktadır. Arpa (*Hordeum vulgare*) bitkilerinin çinko, hidrojen peroksit ve NaCl gibi çeşitli stres etmenlerine maruz bırakılması sonucunda endojen melatonin düzeylerinde belirgin bir artış meydana geldiği rapor edilmiştir. Söz konusu artışın, bitkinin gelişim aşaması ile maruz kaldığı stresin yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Benzer bulgular acı bakla (*Lupinus albus*) fidelerinde de elde edilmiştir (Manchester et al., 2000; Arnao ve Hernández-Ruiz, 2009b).

3.4.5. Melatoninin Bitkilerde Stres Yanıt Mekanizmalarının Güçlendirilmesindeki Etkisi

Melatoninin; düşük ve yüksek sıcaklık, kuraklık, ağır metal stresleri, tuzluluk, kimyasal etmenler ve ultraviyole ışınları gibi çeşitli abiyotik stres koşullarına karşı bitkilerde koruyucu bir işlev üstlendiği ve savunma süreçlerini desteklediği saptanmıştır (Arnao and Hernández-Ruiz, 2015b).

3.4.6. Melatoninin Biyokütle Artışındaki Etkisi

Melatoninin bitki ıslahında kullanılması nedeniyle, bu molekülün bitkilerin biyokütlesi üzerindeki artırıcı etkisinin olup olmadığı da önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Bu amaçla, transgenik bitkilerin geliştirilmesinde melatonin metabolizmasında görev alan indolamin enzimlerinde çeşitli genetik düzenlemelere gidilmiştir (Tan et al., 2013). Melatoninin, bitki büyüme süreçlerinin verimliliğini artırması, stres koşullarına karşı savunma tepkilerini güçlendirmesi ve tohum ile fide çimlenmesini desteklemesi yoluyla bitkilerin biyokütlesini artırabileceği ifade edilmektedir (Posmyk et al., 2008).

3.4.7. Melatoninin Bitkilerdeki Diğer Fonksiyonları

Melatoninin yukarıda belirtilen işlevlerine ek olarak, bitkilerde üstlendiği diğer bazı önemli roller de kapsamlı biçimde araştırılmış ve tartışılmıştır. Bitkilerde melatoninin, kısa gün koşullarında çiçeklenmeyi tetikleyen foto-periyodik ekolojiyle uyumlu olarak karanlık ve aydınlık döngülerine ilişkin sinyaller ürettiği belirlenmiştir. *Chenopodium rubrum* L. gece dönemlerinde ortaya çıkan sirkadiyen ritim yeteneğiyle dikkat çeken bir türdür. Ekzojen melatoninin ise *Chenopodium rubrum* L., *Pterygopappus californicus* Ruprecht ve *Arabidopsis thaliana* gibi birçok bitki türünde çiçeklenme evresine geçişi düzenlediği tespit edilmiştir (Wolf et al., 2001). *Hypericum perforatum* L. (sarı kantaron) türü, üreme fizyolojisi ve çiçek gelişiminin sürdürülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Mononükleat mikrosporogenez aşamasında, izole edilmiş anterlerin yüksek düzeyde indol ve melatonin içerdiği saptanmıştır; bu durum, bitkide artan rejeneratif potansiyele katkı sağlamaktadır (Kolář et al., 2003). Melatonin, mikroorganizmaların uykuda kalmasını ve meyve dokularındaki çeşitli durumların korunmasını sağlayarak kritik bir rol üstlenmektedir. Sukulentlerde gözlenen yüksek melatonin düzeyleri, bu molekülün meyve olgunlaşmasındaki önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca melatonin, büyüme evrelerinin düzenlenmesinde etkili olarak uyku halinin sürdürülmesine katkıda bulunmaktadır. Klorofil parçalanmasında görevli feoforbit enzimleri (klorofilaz, oksijenaz veya kırmızı klorofil katabolit redüktaz) üzerinde belirli düzenleyici etkileri bulunmaktadır. Serbest radikal-lerin oluşumunu sınırlayarak bitkilerde yaşlanma sürecinde gecikmeye de yol açmaktadır.

4. SONUÇ

Melatonin, metoksi-indol yapısıyla karakterize edilen ve memelilerde epifiz bezi tarafından düzenli biçimde salgılanan temel bir hormondur. Organizmanın çeşitli kimyasal, biyolojik ve fizyolojik süreçlerinde işlev üstlenmekte olup özellikle sirkadiyen ritmin düzenlenmesi ve uyku döngüsünün kontrolünde kritik bir role sahiptir. Bu hormonun canlılarda en yüksek düzeyde gece saatlerinde salgılandığı belirlenmiştir. Canlı organizmaların fizyolojik, biyolojik, hormonal ve psikolojik birçok etkinliği belirli bir ritim doğrultusunda gerçekleşmekte; insanlarda vücut sıcaklığı, hormon düzeyleri, uyku-uyanıklık döngüsü ve bazı bilişsel fonksiyonlar da bu ritme paralel olarak değişim göstermektedir. Melatonin sentezindeki yetersizlikler veya reseptör ekspresyonundaki düzensizlikler, obezite, meme kanseri, nörolojik bozukluklar, diyabet, hipertansiyon, prostat kanseri, otoimmün hastalıklar ve duygudurum bozuklukları gibi çeşitli sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilmiştir. Özellikle melatonin molekülünün, kronik uykusuzluk ve uyku bozukluklarının yönetiminde kritik bir rol oynadığı belirlenmiştir. Melatoninin, oksidatif hasarın azaltılmasında hayati bir işlev üstlendiği de gösterilmiştir. Melatonin sentezi ve salınımı karanlık ortamda başlamaktadır; ışığa maruz

kalındığında ise üretim durmaktadır. Bunun yanı sıra, kanser hücrelerinin proliferasyonunu baskıladığı ve tümör gelişimini engelleyici özellikler sergilediği bilinmektedir. Bir dönem yalnızca hayvansal organizmalara özgü bir hormon olduğu kabul edilen melatoninin bitkilerde de bulunduğu ortaya konmuş; yapılan araştırmalar neredeyse tüm bitki türlerinde melatonin varlığını doğrulamış ve bu molekülün hayvanlardakine benzer işlevler üstlendiğini göstermiştir. Bitkilerde melatonin, özellikle hasat sonrası dönemde güçlü bir antioksidan olarak görev yapmakta ve meyve ile sebzelerin raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca strese yanıt genlerinin düzenlenmesi, patojenezle ilişkili proteinlerin aktivasyonu ve antioksidan enzimlerin işlevselliğinin artırılmasında rol oynamaktadır. Bitkilerdeki en temel görevleri arasında sirkadiyen ritmin, büyüme ve gelişme süreçlerinin düzenlenmesi ile çeşitli çevresel stres faktörlerine karşı toleransın artırılması yer almaktadır. Bunun yanında hem abiyotik hem de biyotik stres koşullarına karşı bitkilerin savunma mekanizmalarının güçlendirilmesinde de önemli bir işlev üstlenmektedir. Tüm bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda, melatoninin insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerindeki işlevlerini daha ayrıntılı şekilde ortaya koymak ve anlamak büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Acharya D, Satapathy S, Somu P, Parida UK, Mishra G. 2021. Apoptotic Effect and Anticancer Activity of Biosynthesized Silver Nanoparticles from Marine Algae *Chaetomorpha Linum* Extract Against Human Colon Cancer Cell HCT-116. *Biol Trace Elem Res* 199: 1812–1822.
- Aguilera Y, Herrera T, Liébana R, Rebollo-Hernanz M, Sanchez-Puelles C, Martín-Cabrejas MA. 2015. Impact of Melatonin Enrichment during Germination of Legumes on Bioactive Compounds and Antioxidant Activity. *J Agric Food Chem* 63: 7967–7974.
- Ahmad S, Kamran, M, Ding R, Meng X, Wang H, Ahmad I, Fahad S, Han Q. 2019. Exogenous Melatonin Confers Drought Stress by Promoting Plant Growth, Photosynthetic Capacity, and Antioxidant Defense System of Maize Seedlings. *Peer J* 7:7793.
- Anonymous.2024a. Diabetic Goto Kakizaki Rats as Well as Type 2 Diabetic Patients Show a Decreased Diurnal Serum Melatonin Level and an Increased Pancreatic Melatonin-receptor Status - Peschke - 2006 - *Journal of Pineal Research* - Wiley Online Library Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-079X.2005.00287.x> (accessed on 29 March 2024).
- Anonymous 2024b. Melatonin Effects on Bone: Experimental Facts and Clinical Perspectives - Cardinali - 2003 - *Journal of Pineal Research* - Wiley Online Library Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1034/j.1600079X.2003.00028.x?sid=nlm%3Apubmed> (accessed on 4 March 2024).
- Arendt J. 2000. Melatonin, Circadian Rhythms, and Sleep. *N Engl J Med* 343: 1114–1116.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2006. The Physiological Function of Melatonin in Plants. *Plant Signal Behav* 1: 89–95.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2007. Melatonin Promotes Adventitious- and Lateral Root Regeneration in Etiolated Hypocotyls of *Lupinus Albus* L. *J Pineal Res* 42: 147–152.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2009a. Protective Effect of Melatonin against Chlorophyll Degradation during the Senescence of Barley Leaves. *J Pineal Res* 46: 58–63.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2009b. Assessment of Different Sample Processing Procedures Applied to the Determination of Melatonin in Plants. *Phytochem Anal* 20: 14–18.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2014. Melatonin: Plant Growth Regulator and/or Biosimulator during Stress? *Trends Plant Sci* 19: 789–797.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2015a. Functions of Melatonin in Plants: A Review. *J Pineal Res* 59: 133–150.
- Arnao MB, Hernández-Ruiz J. 2015b. Melatonin: Synthesis from Tryptophan and Its

Role in Higher Plant. Amino acids in higher plants 390–435.

Arnao MB. 2014. Phytomelatonin: Discovery, Content, and Role in Plants. *Adv Bot* 1–11.

Atasoy N. 2019. Melatonin ve Antioksidan Etkileri. *Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 9: 196–201.

Atkins KA, Dodd AN. 2014. Circadian Regulation of Chloroplasts. *Curr Opin Plant Biol* 21: 43–50.

Baghurst, R, Coghill R. 2006. A Study of Melatonin in Plant Tissues and Its Dietary And Health Implications. In *Proceedings of the BIOELECTROMAGNETICS Current Concepts*; Ayrapetyan, S.N., Markov, M.S., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2006; pp. 405–412.

Baltacı AK. 2001. Melatonin, immün sistem ve çinko. *Selcuk Med J* 17: 267–272.

Bernard M, Guerlotti J, Grève P, Gréchez-Cassiau A, Iuvone MP, Zatz M, Chong NW, Klein DC, Voisin P. 1999. Melatonin synthesis pathway: circadian regulation of the genes encoding the key enzymes in the chicken pineal gland and retina. *Reprod Nutr Dev* 39: 325–334.

Beyer CE, Steketee JD, Saphier D. 1998. Antioxidant Properties of Melatonin—an Emerging Mystery. *Biochem Pharmacol* 56: 1265–1272.

Bolliet V, Ali MA, Lapointe FJ, Falcón J. 1996. Rhythmic Melatonin Secretion in Different Teleost Species: An in Vitro Study. *J Comp Physiol B* 165: 677–683.

Brainard GC, Rollag MD, Hanifin JP 1997. Photic Regulation of Melatonin in Humans: Ocular and Neural Signal Transduction. *J Biol Rhythms* 12: 537–546.

Brzezinski A. 1997. Melatonin in Humans. *N Engl J Med* 336: 186–195.

Bubenik GA. 2001. Localization, Physiological Significance, and Possible Clinical Implications of Gastrointestinal Melatonin. *Biol Signals Recept* 10: 350–366.

Burgess HJ, Fogg LF. 2008. Individual Differences in the Amount and Timing of Salivary Melatonin Secretion. *PLOS ONE* 3: 3055.

Burkhardt S, Tan DX, Manchester LC, Hardeland R, Reiter RJ. 2001. Detection and Quantification of the Antioxidant Melatonin in Montmorency and Balaton Tart Cherries (*Prunus Cerasus*). *J Agric Food Chem* 49: 4898–4902.

Buttar, ZA, Wu SN, Arnao MB, Wang C, Ullah I, Wang C. 2020. Melatonin Suppressed the Heat Stress-Induced Damage in Wheat Seedlings by Modulating the Antioxidant Machinery. *Plants* 9: 809.

Cagnacci A, Arangino S, Renzi A, Paoletti AM, Melis GB, Cagnacci P, Volpe A. 2001. Influence of Melatonin Administration on Glucose Tolerance and Insulin Sensitivity of Postmenopausal Women. *Clin Endocrinol (Oxf)* 54: 339–346.

Çam, A, Erdoğan MF. 2003. Melatonin. *Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Mecmuası*, 56: doi:10.1501/Tipfak_0000000058.

Carrillo-Vico A, Calvo JR, Abreu P, Lardone PJ, García-Mauriño S, Reiter RJ, Guer-

- remo JM. 2004. Evidence of Melatonin Synthesis by Human Lymphocytes and Its Physiological Significance: Possible Role as Intracrine, Autocrine, and/or Paracrine Substance. *The FASEB J* 18: 537–539.
- Champney TH, Steger RW, Christie DS, Reiter RJ. 1985. Alterations in Components of the Pineal Melatonin Synthetic Pathway by Acute Insulin Stress in the Rat and Syrian Hamster. *Brain Res* 338: 25–32.
- Claustrat B, Geoffriau M, Brun J, Chazot G. 1995. Melatonin in Humans: A Biochemical Marker of the Circadian Clock and an Endogenous Synchronizer. *Neurophysiol Clin. / Clin Neurophysiol* 25: 351–359.
- Dubocovich ML. 1995. Melatonin Receptors: Are There Multiple Subtypes? *Trends Pharmacol Sci* 16: 50–56.
- Ekmekcioglu C. 2006. Melatonin Receptors in Humans: Biological Role and Clinical Relevance. *Biomed Pharmacother* 60: 97–108.
- Escames G, Guerrero JM, Reiter RJ, Garcia JJ, Munoz-Hoyos A, Ortiz GG, Oh CS. 1997 Melatonin and Vitamin E Limit Nitric Oxide-Induced Lipid Peroxidation in Rat Brain Homogenates. *Neurosci. Lett.* **1997**, 230, 147–150, doi:10.1016/S0304-3940(97)00498-9.
- Fan J, Xie Y, Zhang Z, Chen L. 2018. Melatonin: A Multifunctional Factor in Plants. *Int J Mol Sci* 19: 1528.
- Favero G, Franceschetti L, Buffoli B, Moghadasian MH, Reiter RJ, Rodella LF, Rezzani R. 2017. Melatonin: Protection against Age-Related Cardiac Pathology. *Ageing Res Rev* 35: 336–349.
- Feng X, Wang M, Zhao Y, Han P, Dai Y. 2014 Melatonin from Different Fruit Sources, Functional Roles, and Analytical Methods. *Trends Food Sci Technol* 37: 21–31.
- Garaulet M, Qian J, Florez JC, Arendt J, Saxena R, Scheer FAJL. 2020. Melatonin Effects on Glucose Metabolism: Time To Unlock the Controversy. *Trends Endocrinol Metab* 31: 192–204.
- Garfinkel D, Laudon M, Nof D, Zisapel N. 1995. Improvement of Sleep Quality in Elderly People by Controlled-Release Melatonin. *Lancet* 346: 541–544, 90.
- Gümüsova S, Memiş YS. 2014. Bazı Viral Enfeksiyonlarda Melatoninin Etkileri. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi* 9: 50–54.
- Hardeland R, Poeggeler B. 2012. Melatonin and Synthetic Melatonergic Agonists: Actions and Metabolism in the Central Nervous System. *Cent Nerv Syst Agents Med Chem* 12: 189–216.
- Hardeland R. 2011. Melatonin in Aging and Disease —Multiple Consequences of Reduced Secretion, Options and Limits of Treatment. *Aging Dis* 3: 194–225.
- Hardeland, R. 2013. Melatonin and the Theories of Aging: A Critical Appraisal of Melatonin's Role in Antiaging Mechanisms. *J Pineal Res* 55: 325–356.
- Hotchkiss AK, Nelson RJ. 2002. Melatonin and Immune Function: Hype or Hypothesis? *Crit Rev Immunol* 22: 351–371.

- Jockers R, Delagrange P, Dubocovich ML, Markus RP, Renault N, Tosini G, Cecon E, Zlotos DP. 2016. Update on Melatonin Receptors: IUPHAR Review 20. *Br J Pharmacol* 173: 2702–2725.
- Juhneva-Radenkova, K, Moreno DA, Ikase L, Drudze I, Radenkovs V. 2020. Naturally Occurring Melatonin: Sources and Possible Ways of Its Biosynthesis. *Compr Rev Food Sci* 19: 4008–4030.
- Karunanithi D, Radhakrishna A, Sivaraman KP, Biju VMN. 2014. Quantitative Determination of Melatonin in Milk by LC-MS/MS. *J Food Sci Technol* 51: 805–812.
- Kerman M, Cirak B, Ozguner ME, Dagtekin A, Sutcu R, Altuntas I, Delibas N. 2005. Does Melatonin Protect or Treat Brain Damage from Traumatic Oxidative Stress? *Exp Brain Res* 163: 406–410.
- Kleszczyński K, Slominski AT, Steinbrink K, Reiter RJ. 2020. Clinical Trials for Use of Melatonin to Fight against COVID-19 Are Urgently Needed. *Nutrients* 12: 2561.
- Koçak DA, Çolak DA. 1996. Melatonin ve Santral Sinir Sistemi. *Turgut Özal Tıp Merk Derg* 3.
- Kolář J, Johnson CH, Macháček I. 2003. Exogenously Applied Melatonin (N-Acetyl-5-Methoxytryptamine) Affects Flowering of the Short-Day Plant *Chenopodium Rubrum*. *Physiol Plant* 118: 605–612.
- Kolář J, Macháček I, Eder J, Prinsen E, van Dongen W, van Onckelen H, Illnerová H. 1997. Melatonin: Occurrence and Daily Rhythm in *Chenopodium Rubrum*. *Phytochem* 44: 1407–1413.
- Lee PPN, Shiu SYW, Chow PH, Pang SF. 1996. Regional and Diurnal Studies of Melatonin and Melatonin Binding Sites in the Duck Gastro-Intestinal Tract. *Neurosignals* 4: 212–224, doi:10.1159/000109445.
- Lerner, AB, Case JD, Takahashi Y, Lee TH, Mori W. 1958. Isolation of Melatonin, The Pineal Gland Factor That Lightens Melanocytes. *J Am Chem Soc* 80: 2587–2587.
- Li X, Wei, J.-P.; Scott, E.R.; Liu, J.-W.; Guo, S.; Li, Y.; Zhang, L.; Han, W.-Y. Exogenous Melatonin Alleviates Cold Stress by Promoting Antioxidant Defense and Redox Homeostasis in *Camellia Sinensis* L. *Molecules* **2018**, 23, 165, doi:10.3390/molecules23010165.
- Li, DY, Smith DG, Hardeland R, Yang MY, Xu HL, Zhang L, Yin HD, Zhu Q. 2013. Melatonin Receptor Genes in Vertebrates. *Int J Mol Sci* 14: 11208–11223.
- Lissoni P, Barni S, Tancini G, Mainini E, Piglia F, Maestroni GJ, Lewinski A. 1995. Immunoendocrine Therapy with Low-Dose Subcutaneous Interleukin-2 plus Melatonin of Locally Advanced or Metastatic Endocrine Tumors. *Oncology* 52: 163–166.
- Liu J, Clough SJ, Hutchinson AJ, Adamah-Biassi EB, Popovska-Gorevski M, Dubocovich, ML. 2016. MT1 and MT2 Melatonin Receptors: A Therapeutic Perspective. *Annu Rev Pharmacol Toxicol* 56: 361–383.

- Macchi MM, Bruce JN. 2004. Human Pineal Physiology and Functional Significance of Melatonin. *Front Neuroendocrinol* 25: 177–195.
- Maestroni GJM, Conti A, Pierpaoli W. 1987. The Pineal Gland and the Circadian, Opi-atergic, Immunoregulatory Role of Melatonin. *Ann N.Y Acad Sci* 496: 67–77.
- Maestroni GJM. 1999. Therapeutic Potential of Melatonin in Immunodeficiency States, Viral Diseases, and Cancer. In *Tryptophan, Serotonin, and Melatonin: Basic Aspects and Applications*; Huether, G., Kochen, W., Simat, T.J., Steinhart, H., Eds.; *Advances in Experimental Medicine and Biology*; Springer US: Boston, MA, 1999; pp. 217–226 ISBN 978-1-4615-4709-9.
- Manchester LC, Tan DX, Reiter RJ, Park W, Monis K, Qi W. 2000. High Levels of Melatonin in the Seeds of Edible Plants: Possible Function in Germ Tissue Protection. *Life Sci* 67: 3023–3029, doi:10.1016/S0024-3205(00)00896-1.
- Martin MT, Azpiroz F, Malagelada JR. 1998. Melatonin and the Gastrointestinal Tract. *Therapie* 53: 453–458.
- Molina-Carballo A, Munoz-Hoyos A, Martin-Garcia JA, Uberos-Feritindez J, Rodriguez-Cabezas T, Acuna-Castroviejo D. 1996. 5-Methoxytryptophol and Melatonin in Children: Differences Due to Age and Sex. *J Pineal Res* 21: 73–79.
- Mollaoğlu H, Özgüner M. 2009. Yaşlanma Sürecinde Melatoninin Rolü. *SDÜ Tıp Fak Derg* 12: 52–56.
- Moore CB, Siopes TD. 2003. Melatonin Enhances Cellular and Humoral Immune Responses in the Japanese Quail (*Coturnix Coturnix Japonica*) via an Opi-atergic Mechanism. *Gen Comp Endocrinol* 131: 258–263, doi:10.1016/S0016-6480(03)00011-X.
- Morgan PJ, Barrett P, Howell HE, Helliwell R. 1994. Melatonin Receptors: Localization, Molecular Pharmacology and Physiological Significance. *Neurochem Int* 24: 101–146.
- Mukherjee S. 2018. Novel Perspectives on the Molecular Crosstalk Mechanisms of Serotonin and Melatonin in Plants. *Plant Physiol Biochem* 132: 33–45.
- Murch SJ, Campbell SSB, Saxena PK. 2001. The Role of Serotonin and Melatonin in Plant Morphogenesis: Regulation of Auxin-Induced Root Organogenesis in in Vitro-Cultured Explants of St. John's Wort (*Hypericum Perforatum L.*). *In Vitro Cell. Dev Biol-Plant* 37: 786–793.
- Nabavi SM, Nabavi SF, Sureda A, Xiao J, Dehpour AR, Shirooie S, Silva AS, Baldi A, Khan H, Daglia M. 2019. Anti-Inflammatory Effects of Melatonin: A Mechanistic Review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 59: S4–S16.
- Nagy P, Guillaume D, Daels P. 2000. Seasonality in Mares. *Anim Reprod Sci* 60–61: 245–262.
- Ninomiya T, Iwatani N, Tomoda A, Miike T. 2001. Effects of Exogenous Melatonin on Pituitary Hormones in Humans. *Clin Physiol* 21: 292–299, doi:10.1046/j.1365-2281.2001.00330.x.
- Nosjean O, Ferro M, Cogé F, Beauverger P, Henlin JM, Lefoulon F Fauchère, JL, De-

- lagrange P, Canet E, Boutin JA. 2000. Identification of the Melatonin-Binding SiteMT 3 as the Quinone Reductase 2 *. J Biol Chem 275: 31311–31317.
- Ölmez E, Şahna E, Ağkadi r M, Acet A. 2000. Melatonin: Emeklilik Yaşı 80 Olur mu? Turgut Özal Tıp Merk Derg 7.
- Özçelik F, Erdem M, Bolu A, Gülsün M. 2013. Melatonin: Genel Özellikleri ve Psikiyatrik Bozukluklardaki Rolü. Psikiyatride Güncel Yaklaşımlar 5: 179–203,
- Öztürk G, Akbulut K, Güney Ş. 2020. Melatonin, Aging, and COVID-19: Could Melatonin Be Beneficial for COVID-19 Treatment in the Elderly? Turk J Med Sci 50: 1504–1512.
- Paulis L, Simko F. 2007. Blood Pressure Modulation and Cardiovascular Protection by Melatonin: Potential Mechanisms Behind. Physiol Res 56: 671–684.
- Peschke E, Stumpf I, Bazwinsky I, Litvak L, Dralle H, Mühlbauer E. 2007. Melatonin and Type 2 Diabetes - a Possible Link? J Pineal Res 42: 350–358.
- Peuhkuri K, Sihvola N, Korpela R. 2012. Diet Promotes Sleep Duration and Quality. Nutr Res 32: 309–319.
- Poeggeler B, Hardeland R. 1994. Detection and Quantification of Melatonin in a Dinoflagellate, Gonyaulax Polyedra: Solutions to the Problem of Methoxyindole Destruction in Non-Vertebrate Material. J Pineal Res 17:1–10.
- Posmyk MM, Janas KM. 2009. Melatonin in Plants. Acta Physiol Plant 31.
- Posmyk MM, Kuran H, Marciniak K, Janas KM. 2008. Presowing Seed Treatment with Melatonin Protects Red Cabbage Seedlings against Toxic Copper Ion Concentrations. J Pineal Res 45: 24–31.
- Reiter RJ, Calvo JR, Karbownik M, Qi W, Tan DX. 2000b. Melatonin and Its Relation to the Immune System and Inflammation. Ann N Y Acad Sci 917: 376–386.
- Reiter RJ, Paredes SD, Manchester LC, Tan DX. 2009. Reducing Oxidative/Nitrosative Stress: A Newly-Discovered Genre for Melatonin. Crit Rev Biochem Mol Biol 44: 175–200, doi:10.1080/10409230903044914.
- Reiter RJ, Tan D, Osuna C, Gitto E. 2000a. Actions of Melatonin in the Reduction of Oxidative Stress. J Biomed Sci 7: 444–458.
- Reiter RJ, Tan DX, Manchester LC, Simopoulos AP, Maldonado MD, Flores LJ, Terron MP. 2007. Melatonin in Edible Plants (Phytomelatonin): Identification, Concentrations, Bioavailability and Proposed Functions. World Rev Nutr Diet 97: 211–230.
- Reiter RJ. 1991a. Melatonin: The Chemical Expression of Darkness. Mol Cell Endocrinol 79: C153–C158, doi:10.1016/0303-7207(91)90087-9.
- Reiter RJ. 1991b. Pineal Melatonin: Cell Biology of Its Synthesis and of Its Physiological Interactions. Endocr Rev 12: 151–180, doi:10.1210/edrv-12-2-151.7
- Reiter RJ. 1993. Interactions of the Pineal Hormone Melatonin with Oxygen-Centered Free Radicals: A Brief Review. Braz J Med Biol Res 26: 1141–1155.

- Reppert, SM, Godson C, Mahle CD, Weaver DR, Slaugenhaupt SA, Gusella JF. 1995. Molecular Characterization of a Second Melatonin Receptor Expressed in Human Retina and Brain: The Mel1b Melatonin Receptor. *Proc Natl Acad Sci (PNAS)* 92: 8734–8738.
- Şahin, D. 2014. In vitro koşullarda sirkadien melatonin etkisine maruz bırakılan embriyolarda SOD ve HMGB1 genlerinin ekspresyonları ile melatonin etkisinin takibi. Master Thesis, İstanbul Bilim Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü., 2014.
- Salehi B, Sharopov F, Fokou PVT, Kobylinska A, Jonge L de, Tadio K, Sharifi-Rad J, Posmyk MM, Martorell M, Martins N, et al. 2019. Melatonin in Medicinal and Food Plants: Occurrence, Bioavailability, and Health Potential for Humans. *Cells* 2, 8: 681.
- Salt, A.; Çenesiz, M.; Çenesiz, S. 2017. Melatonin, Etkileri ve Kullanım Alanları. *Etlik Vet Mik Derg* 28: 7–12.
- Sarropoulou V, Dimassi-Theriou K, Therios I, Koukourikou-Petridou M. 2012. Melatonin Enhances Root Regeneration, Photosynthetic Pigments, Biomass, Total Carbohydrates and Proline Content in the Cherry Rootstock PHL-C (*Prunus Avium* × *Prunus Cerasus*). *Plant Physiol Biochem* 61: 162–168.
- Scheer FAJL, Czeisler CA. 2005. Melatonin, Sleep, and Circadian Rhythms. *Sleep Med Rev* 9: 5-9.
- Sewerynek E. 2002. Melatonin and the Cardiovascular System. *Neuro Endocrinol Lett* 23: 1, 79–83.
- Sharif R, Xie C, Zhang H, Arnao MB, Ali M, Ali Q, Muhammad I, Shalmani A, Nawaz MA, Chen P, et al. 2018. Melatonin and Its Effects on Plant Systems. *Molecules* 23: 2352.
- Simonneaux V, Ribelayga C. 2003. Generation of the Melatonin Endocrine Message in Mammals: A Review of the Complex Regulation of Melatonin Synthesis by Norepinephrine, Peptides, and Other Pineal Transmitters. *Pharmacol Rev* 55: 325–395.
- Slaugenhaupt SA, Roca AL, Liebert CB, Altherr MR, Gusella JF, Reppert SM. 1995. Mapping of the Gene for the Mel1a-Melatonin Receptor to Human Chromosome 4 (*MTNR1A*) and Mouse Chromosome 8 (*Mtnr1a*). *Genomics* 27: 355–357.
- Srinivasan V, Spence DW, Pandi-Perumal SR, Trakht I, Cardinali DP. 2008. Jet Lag: Therapeutic Use of Melatonin and Possible Application of Melatonin Analogs. *Travel Med Infect Dis* 6: 17–28.
- Tan DX, Manchester LC, Liu X, Rosales-Corral SA, Acuna-Castroviejo D, Reiter RJ. 2013. Mitochondria and Chloroplasts as the Original Sites of Melatonin Synthesis: A Hypothesis Related to Melatonin's Primary Function and Evolution in Eukaryotes. *J Pineal Res* 54: 127–138.
- Topal T, Öter S, Korkmaz A. 2009. Melatonin ve Kanserle İlişkisi: Journal of General Medicine / Genel Tıp Dergisi. *J. Gen. Med. / Genel Tıp Dergisi* 19: 137–143.

- Touitou Y. 2001. Human Aging and Melatonin. *Clinical Relevance. Exp Gerontol* 36: 1083–1100.
- Turgut M, Uysal A, Yurtseven M. 2003. Epifiz Bezinin Morfolojik Özellikleri, Embriyolojik Gelişimi ve Deneysel Greftleme İşlemleri. *Aktd*, 12.
- Ustundag H, Senturk E. 2020. Agri Ibrahim Cecen Universitesi Saglik Bilimleri Fakultesi, Hemsirelik Bolumu, Agri, Türkiye; Gul, M.; Ataturk Universitesi Tip Fakultesi, Fizyoloji Ana Bilim Dalı, Ezurum, Türkiye Melatonin and Hyperthyroidism. *Arch Basic Clin Res* 2: 59–64, doi:10.5152/ABCR.2020.03
- Uyar A, Alan M. 2008. Koyunlarda Erken Anöstrüs Döneminde Melatonin Uygulamalarının Ovulasyon Ve Gebelik Üzerine Etkisi. *YYU Vet Fak Derg* 19: 47–54.
- Uz T, Arslan AD, Kurtuncu M, Imbesi M, Akhisaroglu M, Dwivedi Y, Pandey GN, Manev H. 2005. The Regional and Cellular Expression Profile of the Melatonin Receptor MT1 in the Central Dopaminergic System. *Brain Res. Mol. Brain Res* 136: 45–53.
- Van Tassel DL, O'Neill SD. 2001. Putative Regulatory Molecules in Plants: Evaluating Melatonin. *J Pineal Res* 31: 1–7.
- Waldhauser F, Weiszenbacher G, Tatzer E, Gisinger B, Waldhauser M, Schemper M, Frisch H. 1988. Alterations in Nocturnal Serum Melatonin Levels In Humans With Growth and Aging*. *J Clin Endocrinol Metab* 66: 648–652.
- Wei Y, Liu G, Chang Y, Lin D, Reiter RJ, He C, Shi H. 2018. Melatonin Biosynthesis Enzymes Recruit WRKY Transcription Factors to Regulate Melatonin Accumulation and Transcriptional Activity on W-Box in Cassava. *J Pineal Res* 65: 12487.
- Witt-Enderby PA, Bennett J, Jarzynka MJ, Firestine S, Melan MA. 2003. Melatonin Receptors and Their Regulation: Biochemical and Structural Mechanisms. *Life Sci* 72: 2183–2198.
- Wolden-Hanson T, Mitton DR, McCants RL, Yellon SM, Wilkinson CW, Matsumoto AM, Rasmussen DD. 2000. Daily Melatonin Administration to Middle-Aged Male Rats Suppresses Body Weight, Intra-abdominal Adiposity, and Plasma Leptin and Insulin Independent of Food Intake and Total Body Fat. *Endocrinology* 141: 487–497.
- Wolf K, Kolář JAN, Witters E, van Dongen W, van Onckelen H, Macháčková I. 2001. Daily Profile of Melatonin Levels in *Chenopodium Rubrum* L. Depends on Photoperiod. *J Plant Physiol* 158: 1491–1493.
- Wurtman RJ, Axelrod J, Chu EW. 1963. Melatonin, a Pineal Substance: Effect on the Rat Ovary. *Science* 141: 277–278.
- Yakupoğlu G, Köklü Ş, Korkmaz A. 2018. Bitkilerde Melatonin ve Üstlendiği Görevler. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi Jockers R, Delagrang P, Dubocovich ML, Markus RP, Renault N, Tosini G, Cecon E, Zlotos DP. 2016. Update on Melatonin Receptors: IUPHAR Review 20. Br J Pharmacol* 173: 2702–2725.
- Yılmaz C, Gökmen V. 2020. Neuroactive Compounds in Foods: Occurrence, Mecha-

nism and Potential Health Effects. Food Res Int 128: 108744.

Yu Y, Lv Y, Shi Y, Li T, Chen Y, Zhao D, Zhao Z. 2018. The Role of Phyto-Melatonin and Related Metabolites in Response to Stress. *Molecules* 23: 1887.

Zhang, R.; Sun, Y.; Liu, Z.; Jin, W.; Sun, Y. 2017. Effects of Melatonin on Seedling Growth, Mineral Nutrition, and Nitrogen Metabolism in Cucumber under Nitrate Stress. *J Pineal Res* 62.

Zhao D, Yu Y, Shen Y, Liu Q, Zhao Z, Sharma R, Reiter RJ. 2019. Melatonin Synthesis and Function: Evolutionary History in Animals and Plants. *Front Endocrinol (Lausanne)* 10: 249.

Zuo B, Zheng X, He P, Wang L, Lei Q, Feng C, Zhou J, Li Q, Han Z, Kong J. 2014. Overexpression of MzASMT Improves Melatonin Production and Enhances Drought Tolerance in Transgenic Arabidopsis Thaliana Plants. *J Pineal Res* 57: 408–417.



MİKROBESİNLERİN (SELENYUM, MAGNEZYUM, ÇİNKO) HASHİMOTO TİROİDİTİ PATOGENEZİNDEKİ ROLÜ

“ ”

*Tuğçe YÜLECİ KURTCU¹,
Tuğba DEMİRİZ YÜCER²*

1 Gıda Müh. Tuğçe YÜLECİ KURTCU, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gıda Toksikolojisi Ana Bilim Dalı, ORCID: 0009-0001-8662-0715

2 Dr. Öğr. Üyesi Tuğba DEMİRİZ YÜCER, Karabük Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik, tugbayucer@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2494-4511

1. GİRİŞ

Hashimoto tiroiditi (HT), tiroid bezini etkileyen en yaygın otoimmün hastalıklardan biridir ve aynı zamanda kronik lenfositik tiroidit olarak da adlandırılır. Son yıllarda hastalığın görülme sıklığında belirgin bir artış gözlenmektedir. Genel toplumda insidansı binde 0,3 ila 1,5 arasında değişmekte olup, özellikle kadınlarda ve beyaz ırkta daha sık görülür. Hastalığın yaygınlığı yaş ilerledikçe artış göstermektedir (Ralli vd., 2020).

HT'nin kesin nedeni tam olarak bilinmemekle birlikte, genetik yatkınlık, çevresel faktörler ve epigenetik mekanizmaların etkileşimi sonucu geliştiği düşünülmektedir. Bu hastalıkta bağışıklık sistemi tiroid dokusunu hedef alarak antikor üretir; bu bağışıklık tepkisi sonucu doku hasarı ve fibrozis oluşur ve zamanla tiroid fonksiyonları azalır. HT hastalarında genellikle tiroid stimulan hormon (TSH) düzeyi yüksek, serbest tiroksin (T4) düzeyi ise düşük olup bu durum hipotiroidizme işaret eder. Tanı koymak için sıklıkla tiroid peroksidaz antikorları (TPOAb) ve tiroglobulin antikorları (TgAb) test edilir; bu antikorların yüksek seviyeleri hastalığın otoimmün kökenli olduğunu gösterir (Caturegli vd., 2014).

Son yıllarda, beslenmenin tiroid fonksiyonu üzerindeki etkilerine olan ilgi giderek artmaktadır. Araştırma çalışmaları, özellikle farklı diyet faktörlerinin ve mikro besinlerin tiroid hormonu sentezi, metabolizması ve işlevi üzerindeki etkisini vurgulamıştır (Knezevic vd., 2020; Krishnamurthy vd., 2021; Rayman, 2019; Street vd., 2024). Beslenme, bireyin genel iyilik halinin sürdürülmesi ve tüm organ ile sistemlerin optimal şekilde işleyebilmesi açısından temel bir bileşendir. Makrobesinler ve mikrobesinler beslenmenin hayati parçalarıdır. Lipitler, karbonhidratlar ve proteinler, enerji ve hormon üreten, molekülleri sentezlemek ve metabolik süreçleri düzenlemek için gereken makrobesinlerdir. Mikrobesinler; gen transkripsiyonu, enzimatik ve hormonal reaksiyonlar, hücre koruma, sinyal iletimi ile birincil ve ikincil metabolizma gibi biyokimyasal süreçler için eser miktarlarda gereklidir (Espinoza-Salas & Gonzalez-Arias, 2024). Mikrobesinler, iyot ve selenyumdan demir ve D vitaminine kadar optimum tiroid fonksiyonunu desteklemede önemli olduğu bulunan, küçük miktarlarda gerekli olan temel vitaminler ve minerallerdir (Espinoza-Salas & Gonzalez-Arias, 2024; Krishnamurthy vd., 2021). Bu çalışmada hashimoto tiroidi olan bireylerde mikrobesinlerden magnezyum, selenyum ve çinko kullanımının etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. MİKROBESİNLER

2.1 Selenyum

Selenyum, insan sağlığı için çok sayıda biyolojik fonksiyona sahip olan temel bir eser elementtir (Santos vd., 2018). Gıdalardaki selenyum çoğunlukla proteinlerle kombinasyon halinde bulunur, bu nedenle et, deniz ürünleri ve

tatlı su balıkları, yumurta, deniz ürünleri, sakatat ve tahıllar gibi ürünlerde mevcut olabilir. Ancak, Brezilya fıstığı ve mantarlar en yüksek selenyum içeriğine sahiptir. Diğer kaynaklar arasında süt ürünleri, soğan, sarımsak ve *Brassica* cinsi bitkiler (brokoli, lahanası ve karnabahar) bulunur (Kieliszek & Błażej, 2016). Gebe olmayan yetişkinler için önerilen günlük selenyum alımı 55 ila 70 µg arasında değişir ve bu miktara özellikle Avrupa’da ve Çin’in bazı bölgelerinde sıklıkla ulaşamaz (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies, 2014; Institute of Medicine, 2000).

Tiroid bezi, glutatyon peroksidaz (GPx), selenoprotein P (SePP), tiyore-doksin redüktaz ve iyodotironin deiyodinazlar gibi selenoproteinlerin yapısına dahil olan en yüksek Selenyum konsantrasyonunu içerir. Bu selenoenzimler, antioksidan ve immünomodülatör olarak hareket ederek tiroid hormonu metabolizmasında önemli roller oynarlar (Santos vd., 2018).

Rostami ve arkadaşlarının (2020) 49 yeni teşhis konmuş HT’li kadın ve 50 sağlıklı kontrol ile yürüttükleri çalışmada, HT hastalarının anlamlı derecede daha düşük serum selenyum (Se) düzeylerine sahip oldukları bildirilmiştir. HT grubunda Se eksikliği sıklığı %58,8 iken, sağlıklı kontrollerde bu oran %34 bulunmuştur. Ayrıca Se eksikliği olan HT hastalarında TSH, TPOAb ve TgAb düzeyleri belirgin şekilde daha yüksek saptanmış; Se konsantrasyonu ile TSH ve TPOAb arasında negatif korelasyonlar tespit edilmiştir. Bu bulgular, HT’de yeterli Se durumunun otoimmün yanıtı ve tiroid fonksiyonlarını olumlu yönde etkileyebileceğini göstermekte; antioksidan durumun desteklenmesinin potansiyel klinik faydalarına işaret etmektedir.

Kryczyk-Kozioł ve arkadaşlarının (2021) yürüttüğü çalışmada, ötiroidizm veya subklinik hipotiroidizmi olan 29 yeni teşhis edilmiş ve tedavi edilmemiş HT’li kadın, altı ay boyunca günlük 100 µg Se takviyesi almıştır. Çalışmanın sonuçları, Se’nin belirgin hipotiroidizmin gelişimini sınırlamada koruyucu etki gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca Se takviyesinin, TPOAb düzeylerini anlamlı derecede azalttığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, tiroid fonksiyonunun stabilize olabileceğini düşündürmektedir; zira tiroid parametreleri (TSH, serbest triiyodotironin, fT3, fT4) çalışma öncesi ve sonrası benzer düzeylerde kalmıştır.

Başka bir çalışma da HT’li hastalarda TgAb ve TPOAb titrelerinin Se takviyesinden sonra azaldığını doğrulamıştır. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, HT, Se eksikliği ve ötiroidizmi olan 100 hasta altı ay boyunca günde 200 µg Se aldı. Üç ve altı aylık tedaviden sonra, hastalardaki genel serum Se seviyesi önemli ölçüde orta düzeye yükseldi. Dahası, TPOAb ve TgAb, altı aylık Se takviyesinden sonra başlangıç seviyesine kıyasla azalmıştır (Wang vd., 2021). Tian ve arkadaşları Se takviyesinin, AIT’li ötiroid hastalarda oksidatif strese karşı savunmayı artırarak TPOAb titresini azalttığını doğrulamıştır (Tian vd., 2020).

Huwiler ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan sistematik derleme ve meta-analiz çalışmasında, Haşimoto tiroiditi (HT) olan hastalarda selenyum takviyesinin tiroid fonksiyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, 35 randomize kontrollü çalışmayı içermekte olup, selenyum takviyesinin tiroid hormon replasman tedavisi (THRT) almayan hastalarda tiroid uyarıcı hormon (TSH) düzeylerini anlamlı şekilde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, selenyum takviyesinin tiroid peroksidaz antikorları (TPOAb) ve malondialdehit (MDA) düzeylerini düşürdüğü gözlemlenmiş, bu da otoimmün tiroid hastalıklarının yönetiminde potansiyel faydalarını ortaya koymuştur. Ancak, serbest tiroksin (fT4) ve serbest triiyodotironin (fT3) gibi diğer tiroid hormonlarında anlamlı bir değişiklik tespit edilmemiştir (Huwiler vd., 2024).

Hu ve arkadaşları tarafından yapılan ve Haşimoto tiroiditi (HT) hastalarında selenyum takviyesinin tiroid otoimmünitesi ve düzenleyici T hücreleri (Treg) üzerindeki etkilerini inceleyen prospektif, randomize kontrollü bir çalışmada altı ay süreyle selenyum mayası tabletleri alan hastalarda, tedavi öncesine ve tedavi almayan kontrol grubuna kıyasla tiroid peroksidaz antikor (TPOAb), tiroglobulin antikor (TGAb) ve tiroid uyarıcı hormon (TSH) düzeylerinde anlamlı azalmalar gözlenmiştir. Ayrıca, selenyum düzeyleri, glutatyon peroksidaz 3 (GPx3) ve selenoprotein P1 (SePP1) seviyelerinde artış saptanmış; aktif Treg hücre oranında yükselme olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, selenyumun antioksidan savunmayı güçlendirdiğini ve immün modülasyonu destekleyerek tiroid otoimmünitesini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, selenyum takviyesi, özellikle subklinik hipotiroidi eşlik eden HT hastalarında potansiyel bir tamamlayıcı tedavi seçeneği olarak değerlendirilebilir (Hu vd., 2021).

Wang ile arkadaşları tarafından deneysel otoimmün tiroidit (EAT) fare modelinde Se takviyesinin CD4+ T hücre alt gruplarına etkisi incelenmiştir. Se takviyesi, tiroid doku hasarını ve lenfosit infiltrasyonunu azaltmış; tiroid hormonları ve otoantikor düzeylerini normalize etmiştir. Ayrıca, inflamatuvar Th1, Th2 ve Th17 hücrelerinden kaynaklanan sitokinlerde azalma, düzenleyici T hücre (Treg) aktivitesinde ise artış gözlenmiştir. Bu bulgular, Se'nin bağışıklık yanıtını modüle ederek otoimmün süreçleri baskılayabileceğini göstermektedir. Çalışma, Se takviyesinin HT gibi hastalıklarda immün dengeyi destekleyici bir tedavi seçeneği olabileceğini öne sürmüştür (Wang vd., 2023).

2.2 Magnezyum

Magnezyum çeşitli biyokimyasal süreçleri düzenleyen 300'den fazla enzim için bir yardımcı faktör olarak insan vücudunda en bol bulunan elementlerden biridir. Bitkisel, hayvansal gıdalarda ve içeceklerde bulunan bir mineraltir. Magnezyumun iyi kaynakları arasında ıspanak, brokoli ve avokado gibi yeşillikler, baklagiller, fındıklar, bademler, tohumlar, muzlar ve tam tahıllar bulunur (Zhang vd., 2019). Magnezyum bağışıklık sistemiyle yakın-

dan ilişkilidir; in vitro deneyler, hücre içi serbest magnezyum iyonlarının T lenfositlerin (Li vd., 2011) ve B lenfositlerin (Deason-Towne vd., 2012) bağışıklık aktivasyonunda önemli bir ikinci haberci olduğunu, magnezyum kanallarının ve taşıyıcı proteinlerin normal bağışıklık fonksiyonunda önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Kuras vd., 2012; Li vd., 2011; Sahni vd., 2010). Dahası, magnezyum hücrel oksidatif stres ve inflamatuvar reaksiyonlarla da ilişkilidir (Nielsen, 2018).

Yapılan bir çalışmada, serum magnezyum (Mg) düzeyleri ile otoimmün tiroidit (AIT) arasındaki ilişkiyi incelemiş ve düşük Mg seviyelerinin tiroid otoantikor pozitifliği ile anlamlı şekilde ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Çin'in Foshan kentinde 1.104 sağlıklı birey üzerinde yapılan analizde, Mg düzeylerinin tiroid peroksidaz antikor (TPOAb) ve tiroglobulin antikor (TgAb) pozitifliğiyle doğrusal olarak ters orantılı olduğu saptanmıştır. Özellikle üreme çağındaki kadınlarda bu ilişkinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Bulgular, Mg eksikliğinin AIT gelişiminde potansiyel bir risk faktörü olabileceğini ve yeterli Mg düzeylerinin otoimmün tiroid hastalıklarına karşı koruyucu rol oynayabileceğini düşündürmektedir (Luo vd., 2023).

Yüksek TPOAb titresini ve hafif iyot eksikliği bulunan latent HT'li hastalarda, kan serumundaki Ca, Mg ve Zn içeriği azalır (Kravchenko vd., 2022). Çok düşük serum Mg, TgAb, HT ve hipotiroidizm riskinin artmasıyla ilişkilidir. En düşük Mg grubunda hipotiroidizm ve subklinik hipotiroidizm riskleri, normal Mg grubuna göre daha yüksek bulunmuştur (Wang vd., 2018).

2.3 Çinko

Çinko (Zn), gen ifadesine ve hücre büyümesine katkıda bulunan ve tiroid hormonu sentezi ve metabolizması dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik süreçlerde yer alan çok sayıda enzim için yardımcı faktör görevi gören bir eser mineraldir (Costa vd., 2023; O'Kane vd., 2018). Çinko açısından zengin en yaygın besinler ıstiridye ve balık, baklagiller, kuruyemişler, kırmızı et, tam tahıllar ve süt ürünleridir (Espinosa-Salas & Gonzalez-Arias, 2024). Tiroid bezinde çinko, tiroid hormonlarının sentezi için gerekli bir enzim olan TPO'nun aktivitesinde kritik bir rol oynar. TPO, tiroid hormonlarının bir protein öncüsü olan tiroglobulinin iyotlanması ve T4 ve T3'ü oluşturmak üzere iyodotirozin kalıntılarının eşleşmesini katalize eder (Severo vd., 2019). In vitro ve in vivo deneysel çalışmalar, çinkonun bir antioksidan gibi davranarak DNA/RNA ve proteinler gibi makromoleküllerin oksidasyonunu azalttığına dair kanıtlar sağlamıştır. Ayrıca, reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunda bir azalmaya yol açarak iltihaplı yanıtı hafifletir (Prasad & Bao, 2019). Otoimmün bozukluklar anormal çinko seviyeleriyle bağlantılıdır ve bozulmuş sinyal iletimine yol açarak bağışıklık tepkisini, hücre fonksiyonunu ve farklılaşmayı etkileyebilir. Çinko eksikliği hem doğuştan hem de adaptif bağışıklık tepkilerini zayıflatabilir. Ek olarak, T hücresi aktivasyonu

ve belirli alt popölasyonlara (Th1, Th2, Th17 ve Treg) farklılaşma çinko den-
gesini önemli ölçüde etkiler (Kravchenko & Zakharchenko, 2023; Maywald
vd. 2018; Maywald & Rink 2015).

Çinko eksikliği çocuklarda ve yetişkinlerde tiroid büyümesi ile ilişkilen-
dirilmiştir. 68 okul çağındaki çocuk üzerinde yapılan çalışma, çinko kon-
santrasyonu ile tiroid boyutu arasında pozitif ters korelasyon olduğunu gös-
termiştir. Araştırmacılar bunun başlıca nedeninin Zn kaybı ve T3 etkisinin
bozulması ve T3'ün nükleer reseptörüne bağlanması olduğunu varsaymışlar-
dır (El-Fadeli vd., 2016). Aynı sonuçlar, Zn konsantrasyonunun tiroid hacmi
ile negatif korelasyon gösterdiği yetişkinlerde (Ertek vd., 2010) ve özellikle
iyot eksikliği bölgelerinde nodüler guatrı olan yetişkinlerde de bulunmuştur
(Turan & Türksoy, 2021). Düşük çinko seviyelerine sahip denekler, otoimmün
tiroid hastalığı ile pozitif bir korelasyon göstermiştir (Ertek vd., 2010). Ancak
bu bulgu tartışmalıdır, çünkü Hashimoto tiroiditi olan kadınlar ile sağlıklı
kontroller arasındaki Zn seviyesi farklılıklarının araştırılması herhangi bir
fark göstermemiştir (Szczepanik vd., 2021), bu da HT'ler ile çinko ilişkileri
arasındaki ilişkinin daha fazla araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır.

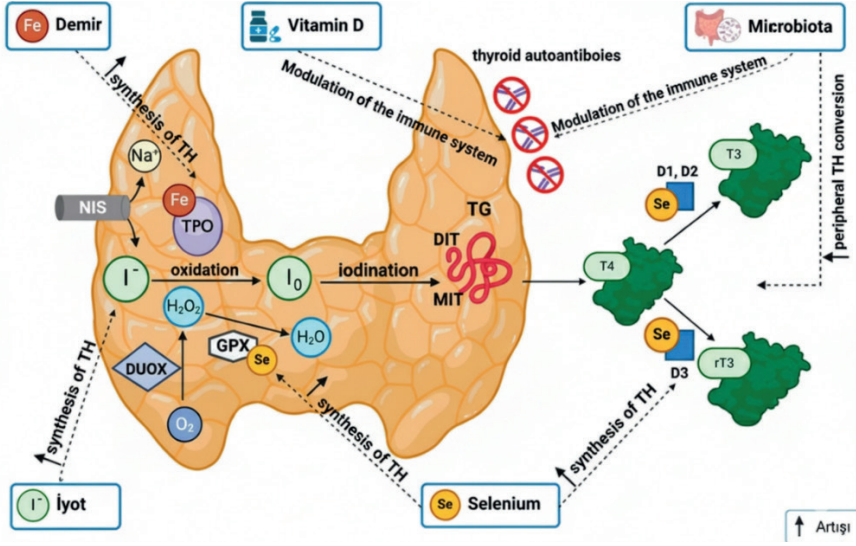
Son zamanlarda, otoimmün tiroiditli çocuk ve ergenlerde serum tiroid
oto-antikör düzeyleri üzerinde 12 hafta boyunca günlük çinko takviyesinin
RCT'sinde tiroid düzeyleri, TPOAb, TgAb ve oksidatif stres belirteçlerinde
bir fark bulunmadığını belirtmekte fayda vardır (Sivakumar vd., 2024). İlginç
bir şekilde, tiroid hormonlarının ve oto-antikör değışikliklerinin olmaması-
na rağmen, levotiroksin doz gereksinimleri kontrol (plasebo) grubunda çin-
ko takviyesi alan grupla karşılaştırıldığında önemli ölçüde arttığı bildirilmiş
(Sivakumar vd., 2024), ancak daha uzun vadeli çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu
nedenle, çinko takviyesi hipotiroid hastalarda yararlı olabilir (Lu vd., 2023;
Sivakumar vd., 2024).

Ostrowska ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, HT'li obez
kadın hastalarda iki azaltıcı diyetin etkinliği ve tiroid parametreleri üzerin-
deki etkileri değerlendirilmiştir. LT4, Selenyum ve çinko alan tüm kadınlar,
daha önce gerçekleştirilen gıda duyarlılığı testlerine uygun olarak, bireysel
olarak dengelenmiş eliminasyon/azaltıcı diyetleri takiben çalışma grubuna
ve aynı kalorik içeriğe sahip, ancak ürün eliminasyonu olmayan azaltıcı di-
yetleri takiben kontrol grubuna rastgele atanmıştır. Antropometrik ve tiroid
parametreleri beslenme müdahalesi sırasında her iki grupta da değışmiştir.
Bu araştırma, kilo vermenin obezite ve HT'den muzdarip hastalarda tiroid
fonksiyonunu iyileştirebileceğini göstermiştir. Dahası, bireysel olarak seçilen
bir eliminasyon azaltıcı diyet, aynı enerji alımı ve makro besin içeriğine sa-
hip klasik azaltıcı diyetlerden daha etkili olmuş ve anti-inflamatuar etkiye
neden olabilecek daha iyi terapötik sonuçlara yol açabileceğini göstermiştir
(Ostrowska vd., 2021).

Bir vaka raporu, HT'li 23 yaşında bir kadında semptomların iyileşmesine ve tiroid antikörlerinin azalmasına yol açan yeni bir yaklaşımı göstermiştir. Yorgunluk, saç dökülmesi, enerji ve ruh hali bozukluğu, uykusuzluk sorunları ve gündüz şekerlemeleri semptomlarıyla başvurmuştur. Tiroid antikörleri güçlü bir şekilde pozitif ve TSH seviyesi normal düzeyde olduğu bildirilmiştir. Beslenme değişiklikleri ve mikronutrient takviyesini içeren bütünleştirici tedavi başlatılmıştır. Bu takviye metilasyon döngüsünü, antioksidan kapasiteyi ve stres yönetimini destekleyerek C, B1, B2, B5, B6, Piridoksal-5 Fosfat, çinko pikolonat, L-5 metiltetrahidrofolat, magnezyum glisinat, selenometiyonin, N-Asetil Sistein ve metil B12 vitaminlerini içermektedir. Hasta tahıl ve süt ürünleri içermeyen bir paleo tarzı diyet uygulanmış ve tolere edilebildiği ölçüde kemik suyu ve fermente gıdaların yanı sıra organik hayvansal protein tüketimini artırmıştır. Ek olarak, günlük meditasyon ve farkındalık teknikleri önerilmiş ve haftada üç kez hafif egzersiz eklenmiştir. 15 aylık tedaviden sonra, antitiroid antikörlerinde bir azalma ve semptomlarda önemli bir rahatlama olduğu bildirilmiştir. Bu vaka, HT'de otoimmünite ve oksidatif strese yönelik bütünlük bir yaklaşımın potansiyel faydalarını göstermiştir (Avard & Grant, 2018).

3. SONUÇ

Hashimoto tiroiditi (HT), genetik ve çevresel etkenlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan, tiroid bezinin kronik inflamasyonu ile karakterize otoimmün bir hastalıktır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, HT'nin yalnızca hormonal açıdan değil, aynı zamanda beslenme temelli faktörlerle de yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, mikrobelerin – özellikle selenyum, magnezyum ve çinko –bağışıklık yanıtı, antioksidan savunma sistemleri ve tiroid hormonlarının sentez/metabolizması üzerindeki etkileri dikkat çekicidir. Şekil 1 de mikrobelerin tiroid fonksiyonları üzerindeki temel etkileri gösterilmektedir.



Şekil 1. Mikrobelerin tiroid fonksiyonları üzerindeki temel etkileri (Shulhai vd. 2024)

Selenyum, glutatyon peroksidaz ve deiyodinaz enzimlerinin yapısında yer alarak oksidatif stresi azaltmakta, böylece tiroid hücrelerini hasara karşı korumakta ve otoantikör düzeylerini düşürerek immün yanıtı modüle etmektedir.

Magnezyum, bağışıklık hücrelerinin aktivasyonu, sitokin salınımı ve inflamatuvar süreçlerin düzenlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Magnezyum düzeylerindeki azalma, oksidatif stresin artışı ve immün yanıtın bozulması yoluyla Hashimoto tiroiditi (HT) gelişimiyle pozitif korelasyon göstermektedir.

Çinko, tiroid hormonlarının biyosentezinde görev alan enzimlerin ko-faktörü olarak işlev görmek ve bağışıklık sisteminin düzenlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, çinko düzeyleri ile Hashimoto tiroiditi (HT) arasındaki ilişki henüz tam olarak aydınlatılamamış olup, bazı çalışmalarda anlamlı bir korelasyon saptanamamıştır.

Elde edilen bulgular, Hashimoto tiroiditi (HT) hastalarında mikrobelerin eksikliklerinin erken dönemde belirlenmesi ve uygun şekilde giderilmesinin, tiroid fonksiyonlarının korunmasına, otoimmün yanıtın baskılanmasına ve genel yaşam kalitesinin artırılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle selenyumun antioksidan savunmayı güçlendirici, magnezyumun inflamasyonu düzenleyici ve çinkonun bağışıklık yanıtını dengeleyici etkileri, HT'nin ilerleyişinde beslenmenin önemini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, mikrobelerin etkileri bireysel farklılıklar, genetik yatkınlık ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, eldeki verilerin

genellenebilmesi için daha geniş örneklem gruplarında, uzun süreli, çift kör ve randomize kontrollü klinik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Mikrobesin destekli tedavi yaklaşımları, klasik hormon replasman tedavisini tamamlayıcı nitelikte olup, HT'nin yönetiminde bütüncül bir strateji geliştirilmesine katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

KAYNAKÇA

- Avard, N., & Grant, S. (2018). A case report of a novel, integrative approach to Hashimoto's thyroiditis with unexpected results. *Advances in Integrative Medicine*, 5, 75–79.
- Caturegli, P., De Remigis, A., & Rose, N. R. (2014). Hashimoto thyroiditis: Clinical and diagnostic criteria. *Autoimmunity Reviews*, 13(4–5), 391–397.
- Costa, M. I., Sarmiento-Ribeiro, A. B., & Gonçalves, A. C. (2023). Zinc: From biological functions to therapeutic potential. *International Journal of Molecular Sciences*, 24, 4822.
- Deason-Towne, F., Perraud, A. L., & Schmitz, C. (2012). Identification of Ser/Thr phosphorylation sites in the C2-domain of phospholipase C γ 2 (PLC γ 2) using TRPM7-kinase. *Journal of Cellular Signalling*, 24, 2070–2075.
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2014). Scientific opinion on dietary reference values for selenium. *EFSA Journal*, 12(10), 3846.
- El-Fadeli, S., Bouhouch, S., Skalny, A. V., Barkouch, Y., Pineau, A., Cherkaoui, M., & Sedki, A. (2016). Effects of imbalance in trace element on thyroid gland from Moroccan children. *Biological Trace Element Research*, 170, 288–293.
- Ertek, S., Cicero, A. F., Caglar, O., & Erdogan, G. (2010). Relationship between serum zinc levels, thyroid hormones and thyroid volume following successful iodine supplementation. *Hormones*, 9, 263–268.
- Espinosa-Salas, S., & Gonzalez-Arias, M. (2024). Nutrition: Micronutrient intake, imbalances, and interventions. In *StatPearls* (Updated September 21, 2023). StatPearls Publishing. Retrieved February 12, 2024, from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK597352/>
- Hu, Y., Feng, W., Chen, H., Shi, H., Jiang, L., Zheng, X., Liu, X., Zhang, W., Ge, Y., Liu, Y., & Cui, D. (2021). Effect of selenium on thyroid autoimmunity and regulatory T cells in patients with Hashimoto's thyroiditis: A prospective randomized-controlled trial. *Clinical and Translational Science*, 14(4), 1390–1402. <https://doi.org/10.1111/cts.12993>
- Huwiler, V. V., Maissen-Abgottspon, S., Stanga, Z., Mühlebach, S., Trepp, R., Bally, L., & Bano, A. (2024). Selenium supplementation in patients with Hashimoto thyroiditis: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Thyroid*, 34(3), 295–313. <https://doi.org/10.1089/thy.2023.0556>
- Institute of Medicine (US) Panel on Dietary Antioxidants and Related Compounds. (2000). *Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids*. National Academies Press.
- Kieliszek, M., & Błażej, S. (2016). Current knowledge on the importance of selenium in food for living organisms: A review. *Molecules*, 21(5), 609.
- Knezevic, J., Starchl, C., Tmava Berisha, A., & Amrein, K. (2020). Thyroid–gut axis: How does the microbiota influence thyroid function? *Nutrients*, 12, 1769

- Kravchenko, V. I., Luzanchuk, I. A., Andrusyshina, I. M., & Bolgov, M. (2022). Retrospective analysis of micro- and macroelement supply in patients with latent autoimmune thyroiditis among residents of the Northern region of Ukraine. *Endokrynologia*, 27(4), 302–310. <https://doi.org/10.31793/1680-1466.2022.27-4.302>.
- Kravchenko, V., & Zakharchenko, T. (2023). Thyroid hormones and minerals in immunocorrection of disorders in autoimmune thyroid diseases. *Frontiers in Endocrinology*, 14, 1225494. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1225494>.
- Krishnamurthy, H. K., Reddy, S., Jayaraman, V., Krishna, K., Song, Q., Rajasekaran, K. E., Wang, T., Bei, K., & Rajasekaran, J. J. (2021). Effect of micronutrients on thyroid parameters. *Journal of Thyroid Research*, 2021, 1865483.
- Kryczyk-Kozioł, J., Zagrodzki, P., Prochownik, E., Błazewska-Gruszczyk, A., Słowiacek, M., Güneş, Q., Schomburg, L., Ochab, E., & Bartyzel, M. (2021). Beneficial effects of selenium supplementation in women with newly diagnosed Hashimoto's thyroiditis in a region with low selenium status. *International Journal of Clinical Practice*, 75, e14484.
- Kuras, Z., Yun, Y. H., Chimote, A. A., Neumeier, L., & Conforti, L. (2012). KCa3.1 and TRPM7 channels at the uropod regulate migration of activated human T cells. *PLoS ONE*, 7, e43859.
- Li, F. Y., Chaigne-Delalande, B., Kanellopoulou, C., Davis, J. C., Matthews, H. F., Douek, D. C., Cohen, J. I., Uzel, G., Su, H. C., & Lenardo, M. J. (2011). Second messenger role for Mg^{2+} revealed by human T-cell immunodeficiency. *Nature*, 475, 471–476.
- Lu, L., Huang, Z., Wang, X., & Chen, J. (2023). Interaction between dietary selenium and zinc intakes on hypothyroidism. *Biological Trace Element Research*, 201, 4667–4676.
- Luo, Y., Zeng, H., Ye, Y., Yu, G., Song, C., Liu, S., Chen, X., Jiang, Y., Duan, H., Li, Y., He, S., Chen, Z., Liu, L., Liang, Y., Lin, X., Wan, H., & Shen, J. (2022). Associations of metal profiles in blood with thyroiditis: A cross-sectional study. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30, 21072–21080. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23625-1>
- Luo, Y., Zeng, H., Ye, Y., Yu, G., Song, C., Liu, S., Chen, X., Jiang, Y., Duan, H., Li, Y., He, S., Chen, Z., Liu, L., Liang, Y., Lin, X., Wan, H., & Shen, J. (2023). Associations of metal profiles in blood with thyroiditis: A cross-sectional study. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 21072–21080. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23625-1>.
- Maywald, M., & Rink, L. (2015). Zinc homeostasis and immunosenescence. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 29, 24–30.
- Maywald, M., Wang, F., & Rink, L. (2018). The intracellular free zinc level is vital for Treg function and a feasible tool to discriminate between Treg and activated Th cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 19, 3575.
- Nielsen, F. H. (2018). Magnesium deficiency and increased inflammation: Current

perspectives. *Journal of Inflammation Research*, 11, 25–34.

- O’Kane, S. M., Mulhern, M. S., Pourshahidi, L. K., Strain, J. J., & Yeates, A. J. (2018). Micronutrients, iodine status and concentrations of thyroid hormones: A systematic review. *Nutrition Reviews*, 76, 418–431.
- Ostrowska, L., Gier, D., & Zyśk, B. (2021). The influence of reducing diets on changes in thyroid parameters in women suffering from obesity and Hashimoto’s disease. *Nutrients*, 13, 862.
- Prasad, A. S., & Bao, B. (2019). Molecular mechanisms of zinc as a pro-antioxidant mediator: Clinical therapeutic implications. *Antioxidants*, 8, 164.
- Ralli, M., Angeletti, D., Fiore, M., D’Aguanno, V., Lambiasa, A., Artico, M., Vincentiis, M., & Greco, A. (2020). Hashimoto’s thyroiditis: An update on pathogenic mechanisms, diagnostic protocols, therapeutic strategies, and potential malignant transformation. *Autoimmunity Reviews*, 19(10), 102649.
- Rayman, M. P. (2019). Multiple nutritional factors and thyroid disease, with particular reference to autoimmune thyroid disease. *Proceedings of the Nutrition Society*, 78, 34–44.
- Rostami, R., Nourooz-Zadeh, S., Mohammadi, A., Khalkhali, H. R., Ferns, G., & Nourooz-Zadeh, J. (2020). Serum selenium status and its association with thyroid function and serum biomarkers of antioxidant defense in Hashimoto’s thyroiditis. *Antioxidants*, 9, 1070.
- Sahni, J., Tamura, R., Sweet, I. R., & Scharenberg, A. M. (2010). TRPM7 regulates quiescent/proliferative metabolic transitions in lymphocytes. *Cell Cycle*, 9, 3565–3574.
- Santos, L. R., Neves, C., Melo, M., & Soares, P. (2018). Selenium and selenoproteins in immune-mediated thyroid disorders. *Diagnostics*, 8(4), 70.
- Severo, J. S., Morais, J. B. S., de Freitas, T. E. C., Andrade, A. L. P., Feitosa, M. M., Fontenelle, L. C., de Oliveira, A. R. S., Cruz, K. J. C., & do Nascimento Marreiro, D. (2019). The role of zinc in thyroid hormones metabolism. *International Journal of Vitamin and Nutrition Research*, 89, 80–88.
- Shulhai, A. M., Rotondo, R., Petraroli, M., Patianna, V., Predieri, B., Iughetti, L., Esposito, S. & Street, M.E. (2024). The role of nutrition on thyroid function. *Nutrients*, 16(15), 2496.
- Sivakumar, R. R., Chinnaiiah Govindareddy, D., Sahoo, J., Bobby, Z., & Chinnakali, P. (2024). Effect of daily zinc supplementation for 12 weeks on serum thyroid auto-antibody levels in children and adolescents with autoimmune thyroiditis: A randomized controlled trial. *Journal of Pediatric Endocrinology and Metabolism*, 37, 137–143.
- Street, M. E., Shulhai, A.-M., Petraroli, M., Patianna, V., Donini, V., Giudice, A., Gnocchi, M., Masetti, M., Montani, A. G., Rotondo, R., Bernasconi, S., Iughetti, L., Espesito, S. M., & Predieri, B. (2024). The impact of environmental factors and contaminants on thyroid function and disease from fetal to adult life: Current

evidence and future directions. *Frontiers in Endocrinology*, 15, 1429884.

- Szczepanik, J., Podgórski, T., & Domaszewska, K. (2021). The level of zinc, copper and antioxidant status in the blood serum of women with Hashimoto's thyroiditis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 7805.
- Tian, X., Li, N., Su, R., Dai, C., & Zhang, R. (2020). Selenium supplementation may decrease thyroid peroxidase antibody titer by reducing oxidative stress in euthyroid patients with autoimmune thyroiditis. *International Journal of Endocrinology*, 2020, 9210572.
- Turan, E., & Turksoy, V. A. (2021). Selenium, zinc, and copper status in euthyroid nodular goiter: A cross-sectional study. *International Journal of Preventive Medicine*, 12, 46.
- Wang, L.-F., Sun, R.-X., Li, C.-F., & Wang, X.-H. (2021). Effects of selenium supplementation on antibody titers in patients with Hashimoto thyroiditis. *Endokrynologia Polska*, 72, 666–667.
- Wang, W., Jiang, Q. L., Xu, Q., Zeng, Y., Jiang, R., & Jiang, J. (2023). Selenium regulates T cell differentiation in experimental autoimmune thyroiditis in mice. *International Immunopharmacology*, 124, 110993.
- Wang, K., Wei, H., Zhang, W., Li, Z., Ding, L., Yu, T., Tan, L., Liu, Y., Liu, T., Wang, H., Fan, Y., Zhang, P., Shan, Z., & Zhu, M. (2018). Severely low serum magnesium is associated with increased risks of positive anti-thyroglobulin antibody and hypothyroidism: A cross-sectional study. *Scientific Reports*, 8(1), 9904. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28362-5>.
- Zhang, H. Y., Teng, X. C., Shan, Z. Y., Wang, Z. J., Li, C. Y., Yu, X. H., Mao, J. Y., Wang, W. W., & Teng, W. P. (2019). Association between iron deficiency and prevalence of thyroid autoimmunity in pregnant and non-pregnant women of childbearing age: A cross-sectional study. *Chinese Medical Journal*, 132(18), 2143–2149.



SÜT TEKNOLOJİSİNDE TEMİZ ETİKET YAKLAŞIMI

“ ”

Pınar UZUN¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Kurum Bilgisi: Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi/ Gelendost MYO/
Gıda Teknolojisi Bölümü Isparta/TÜRKİYE ORCID: 0000-0001-8525-4111Mail: pinaruzun@isparta.edu.tr- pinar.uzunn@gmail.com

GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılda sanayileşme, ülkelerin güvenli gıdaya erişim ve gıda güvenliği eksikliklerini büyük ölçüde gidermesine olanak sağlamıştır. Gıda işleme teknolojileri, ürünlerin raf ömrünü uzatma, gıda kayıpları ve israfını azaltma, besin erişilebilirliğini artırma ve besin öğelerinin korunmasını optimize etme gibi işlevleriyle bu süreçte kritik bir rol üstlenmiştir (Asioli vd., 2017). Ancak bu teknolojilerin yeterli olmadığı durumlar mevcuttur. Bu nedenle modern gıda endüstrisinde gıda katkı maddelerinin kullanımı küresel ölçekte yerleşik bir uygulama hâline gelmiştir. Gıda katkı maddeleri ürünlerin renk, koku, tat ve besin değeri gibi fiziksel ve kimyasal özelliklerinin korunmasında kritik bir işlev üstlenmektedir. Ayrıca, gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda tüketicilerin değişen yaşam tarzları doğrultusunda doğal ve katkısız gıdalara yönelik talep artmıştır (Sharma vd., 2022; Latifah Amin vd., 2013; Wu vd., 2013). Katkı maddelerinin yaygın kullanımına rağmen, birçok tüketici bu maddelerin gerekliliği konusunda kuşku duymaktadır. Gıda katkı maddeleri hakkında teknik ve bilimsel açıdan doğru bilgilerin kamuoyuna yeterince aktarılmaması, tehlikelere ilişkin bilgilerin daha baskın bir şekilde gündeme gelmesine yol açmakta ve sonuç olarak tüketicilerin gıda katkı maddelerinin olası riskleri konusunda endişe duymalarına neden olmaktadır (Chauhan & Rao, 2024; Sharma vd., 2022; Yong vd., 2021).

Günümüzün değişen ve giderek daha karmaşık hâle gelen küresel koşullarında, tüketici yönelimlerinin farklılaşması sonucunda yalnızca güvenli gıdaya yeterli miktarda erişim, tüketici beklentilerini karşılamada artık yeterli olmamaktadır. Modern toplumlarda küreselleşen pazarlar ve gıda tedarik zincirlerinde artan işlem basamakları, tüketicilerin tükettikleri gıdanın “hikâyesini” bilme arzusunu güçlendirmekte; bu durum gıda endüstrisindeki beklenti ve eğilimlerin yeni bir boyuta taşınmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, gıdanın nasıl ve nerede üretildiği gibi unsurlar tüketici algılarının ve tercihlerinin şekillenmesinde önemli bir belirleyici hâline gelmiştir (Asioli vd., 2017).

Sağlıklı yaşam ve sürdürülebilirlik odaklı eğilimler, tüketicilerin günlük beslenmelerinde tükettikleri gıdalarda hangi bileşenlerin bulunduğu ilişkin farkındalıklarını artırmıştır. Bu doğrultuda gıda ürünlerinde yeni bir eğilim ortaya çıkmış ve söz konusu eğilim literatürde sıklıkla *clean label* “temiz etiket” kavramı altında ifade edilmiştir (Zink, 1997). Bu yaklaşım, gıda endüstrisindeki pek çok paydaş tarafından hızla benimsenmiştir. Tüketicilerde artan temiz etiket bilinci, tüketicilerin gıda satın alma tercihlerini yönlendirdiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla gıda endüstrisi, bu pazarda tüketicilerin beklentilerini karşılamak adına kapsamı oldukça geniş ve belirgin şekilde tanımlanmamış bir zorlukla karşı karşıyadır (Chen vd., 2022; Cegiela, 2020; Cheung vd., 2016; Osborn, 2015).

TEMİZ ETİKET KAVRAMI

Temiz etiket kavramına ilişkin günümüzde hâlen yerleşik, nesnel ve evrensel düzeyde kabul görmüş, yasal açıdan bağlayıcı bir tanım bulunmamaktadır. Mevcut tanımların büyük bölümü pazar eğilimi raporlarına dayalı olup, tüketici davranışı araştırmaları ya da sağlam kuramsal çerçevelerle yeterince desteklenmemektedir. Bu durum, “temiz etiket” kavramının hem tüketiciler hem gıda endüstrisi paydaşları tarafından farklı biçimlerde yorumlanmasına ve kavramın zaman içerisinde dinamik bir şekilde evrilmesine neden olmaktadır (Choi vd., 2024; Inguglia vd., 2023; Chen vd., 2022; Maruyama vd., 2021; Yong vd., 2021; Osborn, 2015; Varela & Fiszman, 2013).

Literatürde temiz etiket kavramı genel olarak; karmaşık, bilimsel ya da tüketici açısından kafa karıştırıcı terimler içermeyen, potansiyel olarak tehlikeli veya “kimyasal” olarak algılanan bileşenlerden arındırılmış, sade ve anlaşılır bir içerik listesine sahip ürünlerle ilişkilendirilmektedir (Roobab vd., 2023; Maruyama vd., 2021). Bu anlayış, içerik listesinin kısa olması, minimum düzeyde işlenmiş bileşenler içermesi ve kimyasal terimler ile E-numaralarına benzeyen adlandırmalardan kaçınılmasını da kapsamaktadır (Ingredion, 2014). Benzer şekilde Edwards (2013), temiz etiketi; kimyasal katkı maddeleri içermeyen, kolay anlaşılabilir içerik listelerine sahip ve sınırlı işlem görmüş, geleneksel üretim teknikleri kullanılarak hazırlanmış ürünler olarak tanımlamaktadır (Edwards, 2013).

Temiz etiket kavramının popüler söylemdeki yansımalarına Michael Pollan’ın görüşleri örnek gösterilebilir. Pollan, *In Defence of Food* adlı eserinde tüketicilerin beşten fazla bileşen içeren ya da telaffuz edemedikleri bileşenleri barındıran ürünlerden kaçınmaları gerektiğini ileri sürmektedir (Pollan, 2008). Tüketici odaklı bir diğer açıklamada Ingredion (2014), ambalaj üzerinde yer alan “temiz etiket” ifadesinin, ürünün “doğal”, “organik” ve/veya katkı maddesi ile koruyucu içermeyen bir ürün olarak konumlandırılabilceğini belirtmektedir. Aynı raporda, gıda üreticileri açısından temiz etiket yaklaşımının, tüketicilerin mutfak dolaplarında bulabilecekleri ve genel kabul gören bileşenlerin kullanımını gerektirdiği vurgulanmaktadır (Ingredion, 2014).

Hangi bileşenlerin temiz etiket kapsamında değerlendirilebileceği ya da hangi bileşenlerin yokluğunun bir ürünü temiz etiketli hâle getirdiği konusu netlik kazanmamıştır. Bu durumun temel nedeni, temiz etiket algısının büyük ölçüde tüketicilerin belirli bileşenlere yönelik öznel değerlendirmelerine dayanmasıdır (Busken, 2015). Dolayısıyla, temiz etiketli gıdalar kısmen; doğal kaynaklı koruyucular, renklendiriciler ve aroma bileşenleri içermeleri, buna karşılık yapay katkı maddeleri, yapay koruyucular gibi bileşenlerden arındırılmış olmaları üzerinden tanımlanmaktadır. Hem tüketiciler hem sektör temsilcileri, bu ürünlerin kolay tanımlanabilir doğal bileşenlerden oluştuğu ve çok az kimyasal işlemden geçtiği veya hiç kimyasal işlem gör-

mediği konusunda genel bir uzlaşıya sahip olmakla birlikte, taraflar arasında belirli nüanslar bulunmaktadır (Bowen, 2019; Cassiday, 2017).

Temiz etiket yaklaşımı yalnızca süt ürünleriyle sınırlı olmayıp, tüm gıda işleme kategorilerini kapsayan geniş bir çerçeveyi ifade etmektedir. Bu yaklaşımın temel amacı, ürün formülasyonunda olumsuz algı yaratan yapay bileşenlerin azaltılması veya tamamen kaldırılması ya da bunların doğal kökenli alternatiflerle ikame edilmesidir (Inguglia vd., 2023). Bu bağlamda “temiz etiket” terimi, giderek artan biçimde doğal veya organik olarak nitelendirilen, biyomühendislik ürünü bileşenler içermeyen, hormon veya antibiyotik ilavesinden kaçınılan ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına dayanan gıdalarla ilişkilendirilmektedir (Choi vd., 2024; Maruyama vd., 2021; Cassiday, 2017).

Temiz etiket hareketi çevresel kaygılar ve sürdürülebilirlik gibi çeşitli dinamiklerden etkilenmekle birlikte, literatürde bu hareketin en güçlü itici gücünün, tüketicilerin gıda bileşenlerine ilişkin sağlık temelli endişeleri olduğu yaygın biçimde kabul edilmektedir (Choi vd., 2024; Chen vd., 2022; Maruyama vd., 2021; Yong vd., 2021; Asioli vd., 2017). Bu doğrultuda, temiz etiketli gıdalara yönelik tüketici talebinin giderek arttığı bildirilmektedir. Mordor Intelligence verilerine göre, temiz etiketli ürünler pazarının büyüklüğü 2024 yılı itibarıyla 42,76 milyar ABD dolarına ulaşmış olup, %6,51 bileşik yıllık büyüme oranı ile 2029 yılına kadar 62,12 milyar ABD dolarına yükselmesi beklenmektedir (Mordor, 2024). Benzer şekilde, küresel temiz etiketli gıda ürünleri pazarının 2020 yılında yaklaşık 180 milyar ABD doları büyüklüğünde olduğu, temiz etiketli bileşenler pazarının ise 2021–2026 döneminde 38,8 milyar ABD dolarından 64,1 milyar ABD dolarına çıkacağı öngörülmektedir. COVID-19 pandemisi sürecinde artan sağlıklı beslenme farkındalığı da bu talep artışını desteklemiştir (Vashisht vd., 2025; Balasubramaniam vd., 2023).

Artan talebe paralel olarak, gıda üreticilerinin 2010 yılından itibaren sentetik katkı maddelerini azaltmaya veya tamamen ortadan kaldırmaya yönelik reformülasyon çalışmalarını yoğunlaştırdığı görülmektedir (Maruyama vd., 2021). Bu kapsamda Heinz’in domates ketçabını yüksek fruktozlu mısır şurubundan arındırarak “Simply Heinz” adıyla yeniden konumlandırması, Campbell’s “Well Yes” çorba serisinin modifiye nişasta, yapay renk ve aroma içermeyecek şekilde geliştirilmesi ve Hershey’s ürünlerinde pancar bazı şekerin kamış şekeriyle ikame edilmesi dikkat çekici örnekler arasında yer almaktadır. Ayrıca Kraft Foods, Nestlé, Whole Foods ve Campbell Soup Company gibi firmaların yapay renklendirici, aroma ve koruyucuları ürün portföylerinden çıkarmaya yönelik uygulamaları da bu eğilimi desteklemektedir (Vashisht vd., 2025; Asioli vd., 2017).

Sentetik bileşenlerin azaltılması veya kaldırılması sürecinde ürün güvenliği, kalite özellikleri ve raf ömrü üzerindeki olası etkilerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, temiz etiketin farklı paydaşlar

tarafından farklı biçimlerde yorumlanması, bir ürünün temiz etiketli olarak sınıflandırılmasında yasa koyucular, üreticiler, perakendeciler ve tüketiciler arasında görüş ayrılıklarına yol açabilmektedir (Balasubramaniam vd., 2023).

Genel olarak temiz etiketleme kavramı; katkı maddeleri, aromalar, koruyucular ve benzeri bileşenlerin azaltılması veya kaldırılması yoluyla daha sade ve az işlenmiş ürünler elde etmeyi amaçlayan yeniden formülasyon yaklaşımı, ambalaj ve içerik listesi üzerinden tüketicilerin “doğallık” algısına dayalı yorumları esas alan yaklaşım ve doğal kaynaklardan elde edilen, kimyasal sentez içermeyen ve tüketiciler tarafından kolayca tanınabilen bileşenlerin kullanımını temel alan yaklaşım olmak üzere üç ana çerçevede ele alınmaktadır. Gıda Teknolojileri Enstitüsü’ne göre ise bir ürünün temiz etiketli olarak sınıflandırılabilmesi için, mümkün olan en az sayıda bileşen içermesi, bu bileşenlerin tanınabilir adlara sahip olması ve tüketiciler tarafından sağlıksız ya da alışılmadık olarak algılanabilecek yapay aromalar veya sentetik kimyasallar içermemesi gerekmektedir (Inguglia vd., 2023; Maruyama vd., 2021; Delgado-Pando vd., 2021; Bowen, 2019).

SÜT TEKNOLOJİSİNDE TEMİZ ETİKET YAKLAŞIMI

Temiz etiket yaklaşımı, süt ürünlerinin kaliteyi artırmak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla katkı maddeleri veya koruyucular içermemesi gerektiği varsayımına dayanmaktadır. Ancak uygulamada emülgatörler, stabilizatörler, koyulaştırıcılar, modifiye edici ajanlar, topaklanmayı önleyici maddeler, asitlik düzenleyiciler, renklendiriciler ve aroma vericiler gibi çok sayıda katkı maddesi, ticari süt ürünü formülasyonlarının uzun süredir ayrılmaz bir parçası olmuştur (Roobab vd., 2023). Bu katkı maddelerinin temel kullanım amacı, ürünlerin mikrobiyal güvenliğini sağlamak, kalite özelliklerini korumak ve raf ömrünü uzatmaktır (de Alcántara vd., 2024; Dimeska vd., 2019).

Kodeks tanımına göre süt, herhangi bir katkı veya ekstraksiyon uygulanmamış normal meme salgısı olup doğrudan tüketilebildiği gibi ileri işleme de tabi tutulabilmektedir. Bununla birlikte süt ve süt ürünleri, zengin besin ögesi içerikleri nedeniyle Klebsiella, Bacillus, Pseudomonas, Staphylococcus ve Streptococcus gibi patojen mikroorganizmaların gelişimi için elverişli bir ortam sunmakta ve bu durum ürün güvenliği açısından önemli bir risk oluşturmaktadır (Singh & Gandhi, 2015). Özellikle sıcak iklim koşullarında bu risk daha da belirgin hâle gelmekte, dolayısıyla süt endüstrisinde şeker, tuz, koruyucular (sorbik asit, benzoik asit ve bunların tuzları) ile antioksidanlar gibi katkı maddelerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ancak kimyasal koruyucuların insan sağlığı üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri nedeniyle kullanımları tartışmalı olup, bu durum tüketici algısını da etkilemektedir (Vashisht vd., 2025; Singh vd., 2021).

Katkı maddeleri içerik listesinde yer almaları, özellikle uzun ve kimyasal isimler taşımaları nedeniyle, tüketiciler tarafından sıklıkla “istenmeyen”

veya “kirli” bileşenler olarak algılanmakta ve ürünlerin kabul edilebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Nitekim 2019 yılında Avrupa’da gerçekleştiren ve Lindberg International tarafından yayımlanan bir tüketici araştırması, katılımcıların %73’ünün yapay aroma ve renklendirici içermeyen orijinal süt ürünlerini tercih ettiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, tüketicilerin doğal, organik ve katkı maddelerinden arındırılmış ürünlere yönelik artan ilgisini doğrulamakta; besleyici değeri yüksek, çevre dostu üretim süreçleriyle elde edilmiş, düşük yağlı ve/veya ilave şeker içeriği azaltılmış süt ürünlerine olan talebin güçlendiğini göstermektedir (Roobab vd., 2023; Singh vd., 2021).

Bu tüketici eğilimleriyle paralel olarak, “temiz etiket” kavramı daha doğal, sağlıklı ve minimum düzeyde işlenmiş ürünlerle ilişkilendirilmektedir. Bu doğrultuda üreticiler, formülasyonları basitleştirerek un, süt, şeker, bitkisel yağlar, otlar ve baharatlar gibi tanıdık bileşenlere yönelmekte ve yapay katkı maddelerinden kaçınmaktadır. Güncel pazar eğilimlerine duyarlı olan süt ürünleri sektörü de bu yaklaşımı benimseyerek temiz etiket stratejilerini uygulamaya koymuştur (de Alcântara vd., 2024; Roobab vd., 2023).

Son yıllarda süt ürünlerinde temiz etiketli ürünlere yönelik akademik çalışmaların sayısında da belirgin bir artış gözlenmektedir (Choi vd., 2024; Zheng vd., 2021). Yoğurt, peynir ve dondurma gibi ürünlerde koruyucular, stabilizatörler, emülgatörler ile yapay renklendirici ve aroma vericilerin formülasyondan çıkarılması veya doğal ve tanımlanabilir alternatiflerle ikame edilmesine yönelik çok sayıda araştırma yürütülmüştür (Vashisht vd., 2025).

Literatürde, doğal bileşenlerin süt ürünlerindeki kullanımı ve bu bileşenlerin kalite, güvenlik ve raf ömrü üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde ele alınmıştır (Roobab vd., 2023; Vashisht vd., 2025). Temiz etiketli ürün geliştirme yaklaşımı, sentetik katkı maddelerinin kısmen azaltılmasını veya tamamen ortadan kaldırılmasını ve bunların yerine doğal kaynaklı katkı maddelerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda doğal antimikrobiyal ajanlar, doğal antioksidanlar, karotenoidler ve uçucu yağlar öne çıkmakta; özellikle tarçın, biberiye, kekik ve mercanköşk gibi bitkilerden elde edilen uçucu yağlar ile kitosan, gıda formülasyonlarında doğal antimikrobiyal maddeler olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır (Vashisht vd., 2025; de Alcântara vd., 2024; Choi vd., 2024; Balasubramaniam vd., 2023).

Antimikrobiyal bileşikler, süt endüstrisinde ürün güvenliğinin sağlanması, kalite ve besin değerinin korunması ve raf ömrünün uzatılması gibi çok yönlü amaçlarla kullanılmaktadır. Bu maddeler, bozulmaya neden olan bakteri, maya ve küflerin gelişimini inhibe ederek ürün stabilitesini artırmaktadır. Bununla birlikte, kullanılan antimikrobiyal ajanların gıda güvenliğini tehlikeye atmaması temel bir gereklilik olup, bu husus özellikle temiz etiketli antimikrobiyallerin geliştirilmesinde kritik önem taşımaktadır (Choi vd., 2024).

Süt endüstrisinde potansiyel olarak kullanılan koruyucular arasında hidrojen peroksit, sorbik asit ve sorbatlar (E200–203), nisin (E234), natamisin (E235), laktoferrin, laktoperoksidaz, propiyonik asit (E280), asetik asit (E260) ve benzoik asit (E210) yer almaktadır (Alan & Öksüztepe, 2020). Sodyum benzoat (E211), FDA tarafından gıda ürünlerinde kullanımına izin verilen ilk kimyasal koruyucular arasında yer almakta ve yüksek çözünürlüğü nedeniyle tercih edilmektedir. Peynir ve yoğurt gibi ürünlerde yaygın olarak kullanılan benzoatlar, sorbatlar ve natamisin, bakteri, maya ve küf gelişimini engellemek amacıyla kullanılmaktadır (Dimeska vd., 2019).

Süt ve süt ürünlerinin güvenliğinin değerlendirilmesinde, kullanılan katkı maddelerinin kabul edilebilir günlük alım (Acceptable Daily Intake, ADI) değerleri temel bir kriterdir. ADI, bir maddenin yaşam boyu her gün tüketilmesi durumunda dahi sağlık riski oluşturmayan maksimum alım düzeyini ifade etmekte olup, vücut ağırlığına göre mg/kg cinsinden belirlenmektedir. Gıda katkı maddelerinin güvenliği, toksikolojik çalışmalar temel alınarak belirlenen ADI değerleri ve maruziyet değerlendirmeleri aracılığıyla sağlanmakta; bu süreçte basit tarama yöntemlerinden olasılıksal modellemeye kadar farklı analitik yaklaşımlar kullanılmaktadır (Dimeska vd., 2019).

Süt ve süt ürünlerinde taşıdığı, kalite ve tüketici güvenliği açısından önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. Su, nişasta, şeker, jelatin, bitkisel yağlar veya melamin gibi maddelerin eklenmesi ya da değerli bileşenlerin uzaklaştırılması yoluyla gerçekleştirilen taşıdığı, hem ekonomik kayıplara hem potansiyel sağlık risklerine yol açmaktadır. Bu nedenle süt ürünlerinde koruyucu kullanımı ile taşıdığı uygulamalarının işleme, kalite ve sağlık üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Singh & Gandhi, 2015).

SÜT ÜRÜNLERİNDE TEMİZ ETİKET UYGULAMA KISITLARI

Süt ürünleri endüstrisi, ürün formülasyonlarına temiz etiketli bileşenlerin dâhil edilmesi sürecinde çeşitli teknik, ekonomik ve düzenleyici zorluklarla karşı karşıyadır (Roobab vd., 2023). Süt sektöründe temiz etiket eğilimine ilişkin SWOT (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler) analizler mevcuttur. Temiz etiketli ürünler genellikle daha az koruyucu ve katkı maddesi içerdiğinden, tüketici beklentilerini karşılayan; aynı zamanda lezzet, işlevsellik ve raf ömrünü koruyabilen ürünlerin geliştirilmesi önemli bir güçlük oluşturmaktadır. Bu durum, süt ürünlerinin duyu özellikleri ve stabilitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmekte; dolayısıyla kalite kaybı olmaksızın geleneksel bileşenlerin fonksiyonlarını karşılayabilecek uygun alternatiflerin belirlenmesi için kapsamlı araştırma ve geliştirme yatırımlarını gerekli kılmaktadır (Vashisht vd., 2025).

Sentetik bileşikler, genellikle iyi tanımlanmış yapıları ve partiler arası düşük değişkenlikleri ile öne çıkarken; doğal bileşenler çoğu zaman proses ve

depolama stabilitesi açısından daha sınırlı özellikler göstermektedir. Doğal bileşenlerin, gıdanın organoleptik özelliklerini olumsuz etkilemeden işlevlerini yerine getirmesi büyük önem taşımaktadır. Örneğin, bitki bazlı uçucu yağlar güçlü antimikrobiyal aktivite sergileyebilmekle birlikte, ürünlerde istenmeyen tat ve aroma değişikliklerine yol açabilmektedir. Ayrıca, bu bileşiklerin suda çözünürlük ve stabilite sorunları bulunabilmektedir. Benzer şekilde, bazı protein bazlı doğal antimikrobiyaller, termal olmayan işlemler sırasında antimikrobiyal etkinliklerini kaybedebilmektedir. Doğal renklendirici kaynaklarından elde edilen antosiyaninler, betalainler ve karotenoidler gibi pigmentler ise ısı, asidik ortam ve ışığa duyarlı olup, işleme ve uzun süreli depolama sırasında bozunabilmektedir. Bu sınırlamaların aşılması amacıyla, doğal bileşenlerin işlevselliklerini korurken stabilitelerini artırmaya yönelik nanokapsülleme ve benzeri yenilikçi yaklaşımlar üzerine araştırmalar devam etmektedir (Balasubramaniam vd., 2023).

Temiz etiketli bileşenlerin tedariki ve sürekliliği de önemli sınırlamalar arasında yer almaktadır. Doğal ve minimum düzeyde işlenmiş bileşenlere yönelik artan talep, kalite ve sürdürülebilirlik standartlarını karşılayan güvenilir tedarik kaynaklarının bulunmasını zorlaştırmakta ve tedarik zincirinde aksamalara neden olmaktadır. Bu sorunlar, hammadde fiyatlarındaki dalgalanmalar ve farklı bileşen gruplarında tutarlı kalite sağlama gerekliliği ile daha da belirgin hâle gelmektedir (Vashisht vd., 2025).

Yasal düzenlemeler de temiz etiketli ürünlerin geliştirilmesinde önemli bir engel teşkil etmektedir. Ülkeler arasında farklılık gösteren gıda etiketleme ve mevzuat gereklilikleri, inovasyon süreçlerini ve pazar erişimini sınırlayabilmektedir. Bu düzenlemelere uyum sağlamak, önemli ölçüde uzmanlık ve kaynak gerektirmekte; bu durum, süt işleme endüstrisinde temiz etiket uygulamalarının benimsenmesini daha karmaşık hâle getirmektedir. Bununla birlikte, söz konusu zorluklara rağmen temiz etiket stratejisini benimseyen süt ürünleri üreticileri için önemli fırsatlar da söz konusudur. Tüketicilerin temiz etiketli ürünlere yönelik artan ilgisi, firmalara rekabetçi pazarda farklılaşma ve rekabet avantajı elde etme imkânı sunmaktadır. Şeffaf ve kalite odaklı bir yaklaşım benimsemek, sağlık ve sürdürülebilirlik bilincine sahip tüketiciler arasında güven ve marka sadakatinin artmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, temiz etiketli bileşenlere olan talep, gıda endüstrisinde inovasyonu teşvik ederek doğal bileşenlerin işlevselliğini ve stabilitesini artırmaya yönelik yeni teknolojilerin ve proseslerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. Araştırma ve geliştirmeye yatırım yapan şirketler, bu eğilimden faydalananarak tüketici beklentilerine daha etkin biçimde yanıt verebilmektedir. Buna ek olarak, temiz etiketli bileşenlerin kullanımı, işletmelere çevresel ayak izlerini azaltma ve sürdürülebilirlik performanslarını güçlendirme fırsatı sunmaktadır (Holt vd., 2024).

KAYNAKLAR

1. Alan, S., & Öksüztepe, G. (2020). Gıda katkı maddeleri ve süt endüstrisinde kullanılan antimikrobiyaller. *Bozok Veterinary Sciences*, 1(1-2), 44-50.
2. 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.022>
3. Balasubramaniam, V. M., Lee, J., & Serventi, L. (2023). Understanding new foods: development of next generation of food processing, packaging, and ingredients technologies for clean label foods. L. Serventi (Ed.), *Sustainable Food Innovation* (ss. 157-167). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12358-0_12
4. Bowen, J. (2019). Controlling contaminants: The new facet of ‘clean label’. *New Food*.
5. Busken, D. F. (2015). Cleaning it up—What is a “clean label” ingredient. *Cereal Foods World*, 60(2), 112-113.
6. Cassiday, L. (2017). Clean label: The next. *inform*, 28(8), 7.
7. Cegiëlka, A. (2020). “Clean label” as one of the leading trends in the meat industry in the world and in Poland-a review. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 71(1). <https://bibliotekanauki.pl/articles/876577.pdf>
8. Chauhan, K., & Rao, A. (2024). Clean-label alternatives for food preservation: An emerging trend. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35815>
9. Chen, A., Kayrala, N., Trapeau, M., Aoun, M., & Bordenave, N. (2022). The clean label trend: an ineffective heuristic that disserves both consumers and the food industry? *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 4921-4938. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13031>
10. Cheung, T. T. L., Junghans, A. F., Dijksterhuis, G. B., Kroese, F., Johansson, P., Hall, L., & De Ridder, D. T. D. (2016). Consumers’ choice-blindness to ingredient information. *Appetite*, 106, 2-12.
11. Choi, D., Bedale, W., Chetty, S., & Yu, J.-H. (2024). Comprehensive review of clean-label antimicrobials used in dairy products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), e13263. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13263>
12. de Alcântara, N. E., Tavares Filho, E. R., Pimentel, T. C., Pagani, M. M., Mársico, E. T., da Cruz, A. G., & Esmerino, E. A. (2024). Use of distinct projective techniques in investigating participants’ perception of a clean label dairy product: A study on the presence of additives/stabilizers in ultra high temperature processing milk’s label in Brazil. *Journal of Sensory Studies*, 39(4), e12935. <https://doi.org/10.1111/joss.12935>
13. Delgado-Pando, G., Ekonomou, S. I., Stratakou, A. C., & Pintado, T. (2021). Clean label alternatives in meat products. *Foods*, 10(7), 1615. <https://doi.org/10.3390/>

foods10071615

14. Dimeska, S., Dolevska, S., Matevska, S., & Arapcheska, M. (2019, Ağustos). Use of food additives in dairy products. *conference of agronomy students*, Faculty of Agronomy – Čačak. <https://eprints.uklo.edu.mk/id/eprint/6307/>
15. Edwards, A. (2013). Natural & clean label trends. *Ingredion Incorporated*, 688.
16. Holt, D., Slade, P., & Hobbs, J. (2024). Do consumers care about clean labels? Willingness to pay for simple ingredient lists and front-of-package labels on beef and plant-based burgers. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne d'agroeconomie*, 72(1), 5-21. <https://doi.org/10.1111/cjag.12346>
- Ingredion. (2014). The clean label guide in Europe. Retrieved from <http://www.alimentatec.com/wp-content/uploads/2014/10/The-Clean-Label-Guide-to-Europe.pdf>
17. Inguglia, E. S., Song, Z., Kerry, J. P., O'Sullivan, M. G., & Hamill, R. M. (2023). Addressing Clean label trends in commercial meat processing: Strategies, challenges and insights from consumer perspectives. *Foods*, 12(10), 2062. <https://doi.org/10.3390/foods12102062>
18. Latifah Amin, L. A., Md. Abul, K. A., & Abdul Latif Samian, A. L. S. (2013). Factor influencing risk perception of food additives. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133277428>
19. Maruyama, S., Streletskaia, N. A., & Lim, J. (2021). Clean label: Why this ingredient but not that one? *Food Quality and Preference*, 87, 104062. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104062>
20. Mordor Intelligence. (2024). Clean label ingredients market size & share analysis – Growth trends and forecasts (2024-2029). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/clean-label-ingredients-market>
21. Osborn, S. (2015). Labelling relating to natural ingredients and additives. *Advances in food and beverage labelling* (ss.207-221). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978178242085950012X>
22. Pollan, M. (2008). Book Club Kit: An Eater's Manifesto. *In Defense of Food*. Penguin Press.
23. Roobab, U., Inam-Ur-Raheem, M., Khan, A. W., Arshad, R. N., Zeng, X., & Aadil, R. M. (2023). Innovations in high-pressure technologies for the development of clean label dairy products: A Review. *Food Reviews International*, 39(2), 970-991. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1928690>
24. Sharma, H., Mahajan, G., Kaur, M., & Gupta, R. (2022). Additives in dairy-based food. A. K. Nadda & G. Goel (Ed.), *Microbes for Natural Food Additives* (ss. 169-203). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5711-6_8
25. Singh, A. K., Ramakanth, D., Kumar, A., Lee, Y. S., & Gaikwad, K. K. (2021). Active packaging technologies for clean label food products: A review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(5), 4314-4324. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01024-3>

26. Singh, P., & Gandhi, N. (2015). Milk preservatives and adulterants: Processing, regulatory and safety issues. *Food Reviews International*, 31(3), 236-261. <https://doi.org/10.1080/87559129.2014.994818>
27. Varela, P., & Fiszman, S. M. (2013). Exploring consumers' knowledge and perceptions of hydrocolloids used as food additives and ingredients. *Food hydrocolloids*, 30(1), 477-484.
28. Vashisht, P., Singh, L., Saini, G. S., Gill, A., Verma, D., Sharma, A., Bihola, A., Sahni, O., Kaur, J., & Chauhan, D. S. (2025). Review of potential clean label ingredients in yogurt, cheese and ice cream sector. *Food and Humanity*, 4, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100474>
29. Wu, L., Zhang, Q., Shan, L., & Chen, Z. (2013). Identifying critical factors influencing the use of additives by food enterprises in China. *Food Control*, 31(2), 425-432.
30. 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), 173-184. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2020.e96>
31. Zheng, X., Shi, X., & Wang, B. (2021). A review on the general cheese processing technology, flavor biochemical pathways and the influence of yeasts in cheese. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.703284>
32. Zink, D. L. (1997). The impact of consumer demands and trends on food processing. *Emerging infectious diseases*, 3(4), 467.



**İĞDE (*ELAEAGNUS
ANGUSTİFOLIA* L.):
FİTOKİMYASAL BİLEŞİM,
BİYOLOJİK AKTİVİTELER VE
GIDA-ÇEVRE UYGULAMALARI**

“=====”

Şelale Öncü Glaue¹

¹ Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Efes Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID:
0000-0003-4757-6640

1. Giriş

Antik çağlardan bu yana doğal ürünler, insanların pek çok hastalıkla mücadele etmek amacıyla başvurduğu temel kaynaklar arasında yer almıştır (Doğan ve ark., 2023). Doğal ürünler içinde bitkiler; gıda temini başta olmak üzere barınma, ısınma, araç-gereç üretimi ve tıbbi amaçlar gibi çok farklı alanlarda değerlendirilmeleri nedeniyle öne çıkmaktadır (El-Chaghaby ve ark., 2024). Besleyici nitelikleriyle günlük beslenmenin merkezinde yer alan bitkilerin, yalnızca besin değeriyle sınırlı kalmayıp hastalıkların önlenmesi ve desteklenmesinde de önemli bir rol üstlendikleri bildirilmektedir. Nitekim literatürde bitkisel kaynakların antikanser, antimikrobiyal, antioksidan, antiinflamatuvar, antiproliferatif, hepatoprotektif, antialerjik, antiaging ve DNA koruyucu etkiler dâhil geniş bir biyolojik aktivite yelpazesi gösterebildiği ortaya konmuştur (Karcioglu ve ark., 2011; Özer ve ark., 2018; Korkmaz ve ark., 2021; Mohammed ve ark., 2020). Bu bağlamda bitkilerin kimyasal bileşimlerinin ve biyolojik etkilerinin araştırılması, potansiyel kullanım alanlarının bilimsel temelde belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Comlekcioglu, 2019).

Bu bölümün odağında yer alan *Elaeagnus angustifolia*, Elaeagnaceae familyasında yer almakta olup kaynaklarda “Russian olive”, “silver berry”, “oleaster” ve “wild olive” gibi adlarla anılmaktadır. Güney Avrupa ile Orta Doğu ve Orta Asya bölgelerine özgü olduğu belirtilen bu hızlı gelişen tür, zeytine benzer yenilebilir ve besleyici meyvesi nedeniyle “oleaster” ve “Russian olive” adlarıyla ilişkilendirilmektedir (Fonia ve ark., 2009).

Botanik açıdan *E. angustifolia*’nın 80–100 yıl arasında yaşayabildiği; yaklaşık 10 m boya ve 30 cm gövde çapına ulaşabildiği, yapraklarının mızrakı (lanceolat) formda olduğu ve kenarlarının düzgün bir yapı sergilediği ifade edilmektedir. Dört loplulı, krem-sarı renkli çiçeklerin çoğunlukla kümeler halinde oluştuğu; bitkinin 5–6 yıl içinde meyve vermeye başlayabildiği rapor edilmiştir. Meyvelerin tatlı, kuru ve unumsu bir doku karakteri sergileyebildiği; meyve ve tohumların çiğ ya da pişirilerek tüketilebildiği, ayrıca meyvelerden tatlı ve şerbet gibi geleneksel ürünlerin hazırlanabildiği belirtilmektedir (Hällzon ve ark., 2022).

Tıbbi bitkiler ve şifalı otlar, içeriklerindeki biyoaktif bileşik çeşitliliği nedeniyle uzun yıllardır yaygın biçimde kullanılmaktadır (Mohammadhosseini ve ark., 2019). *E. angustifolia*’nın yaprak, kabuk, çiçek, meyve ve tohum gibi kısımlarından hazırlanan dekoksasyonların geleneksel uygulamalarda farklı rahatsızlıklarda kullanıldığı; modern çalışmalarda ise antiinflamatuvar, antioksidan, kardiyoprotektif, antimikrobiyal ve antikanser potansiyel sergileyebildiğinin bildirildiği görülmektedir. Özellikle flavonoidler ve fenolik bileşenlerin; serbest radikalleri süpürme, oksidatif enzimleri inhibe etme ve metal iyonlarını şelatlama gibi mekanizmalar üzerinden hücreleri oksidatif

strese karşı koruyarak dejeneratif hastalık riskini azaltmaya katkı sağlayabileceği belirtilmektedir (Tehranizadeh ve ark., 2016). Bununla birlikte polisakkaritler, amino asitler, saponinler, karotenoidler, vitaminler, kumarinler, fenol karboksilik asitler, tanenler ve uçucu yağlar gibi geniş fitokimyasal çeşitlilik, türün besinsel ve nutrasötik açıdan umut vadeden bir kaynak olabileceğini düşündürmekte ve daha ileri araştırmaları gerekli kılmaktadır (Bucur ve ark., 2008).

Bu bölüm kapsamında *E. angustifolia*'nın kullanım alanları, kimyasal/fitokimyasal bileşimi (özellikle fenolik içerik) ve biyolojik aktivitelerine ilişkin literatür bulguları; türün botanik-ekolojik özellikleriyle birlikte, bütüncül bir çerçevede sunulmuştur.

2. Fitokimyasal ve Besinsel Bileşim

Fitokimyasal incelemeler, *Elaeagnus angustifolia*'nın farklı kısımlarında çok sayıda biyoaktif bileşiğin bulunduğunu ve bu bileşiklerin geniş bir biyolojik etki yelpazeyle ilişkilendirilebildiğini göstermektedir. Literatürde özellikle olgun meyvelerin bileşiminde indirgen şekerlerin yüksek düzeylerde yer aldığı; toplam şeker miktarının da buna paralel şekilde önemli bir paya sahip olduğu bildirilmektedir. Meyvede ayrıca pektik polisakkaritlerin, toplam flavonoidler ve polikarboksilik asitlerin, saponinlerin ve tanenlerin belirli oranlarda bulunduğu; askorbik asit ve β -karoten gibi antioksidan karakterli bileşenlerin de bileşime katkı sunduğu rapor edilmiştir (Tehranizadeh ve ark., 2016).

Uçucu yağ bileşimi açısından değerlendirildiğinde, *E. angustifolia*'nın çiçek ve yapraklarından izole edilen uçucu yağlarda oksijenli bileşiklerin baskın olduğu, hidrokarbon fraksiyonunun ise daha düşük oranlarda seyrettiği belirtilmektedir (Torbatı ve ark., 2016). Mineral kompozisyon bakımından, meyvede potasyumun en yüksek düzeyde bulunan mineral olduğu; bunu sodyum ve fosfor gibi elementlerin izlediği bildirilmiştir. Fenolik profil açısından ise meyvede belirli fenolik asitlerin (özellikle 4-hidroksibenzoik asit ve kafeik asit) öne çıktığı; ayrıca şeker kompozisyonunda fruktoz ve glukozun başlıca bileşenler arasında yer aldığı rapor edilmektedir (Hamidpour ve ark., 2019). Yağ asidi bileşiminde ise palmitik asit ve oleik asidin başat yağ asitleri arasında bulunduğu; bunun yanında lignoserik asit gibi uzun zincirli yağ asitlerinin de kayda değer düzeylerde saptandığı bildirilmektedir (Sahan ve ark., 2015).

İğdenin kök, yaprak, çiçek ve meyve gibi farklı kısımlarında biyolojik açıdan aktif çok sayıda bileşiğin bulunduğu; bu çeşitliliğin hem gıda hem de farmakolojik kullanım açısından türün önemini artırdığı bildirilmektedir. İğdenin kök, yaprak, çiçek ve meyve gibi farklı bitkisel kısımlarında biyolojik açıdan aktif çok sayıda bileşiğin bulunduğu bildirilmektedir. Bu bileşiklerin önemli bir bölümünü fenolikler başta olmak üzere polifenoller ve flavonoidler

oluştururken; alkaloidler ve uçucu yağlar gibi diğer fitokimyasal grupların da biyolojik etkilere katkı sunduğu değerlendirilmektedir. Söz konusu bileşenlerin serbest radikalleri nötralize ederek oksidatif stresi azaltma, inflamatuar yanıtı baskılama ve bazı mikroorganizmaların gelişimini sınırlandırma gibi mekanizmalar üzerinden etkili olabildiği belirtilmektedir. Bu bağlamda, iğde bileşimindeki fenolik maddelerin insan sağlığı üzerindeki olası olumlu sonuçları ve farmakolojik potansiyeline ilişkin bulgular, türün tıbbi önemini güçlendirmekte ve ilaç geliştirme süreçleri için umut vadeden bir doğal kaynak olabileceğine işaret etmektedir.

2.1 Karbonhidratlar

Olgunlaşmış *E. angustifolia* meyvesinin karakteristik tadı, bileşimindeki karbonhidratlarla yakından ilişkilidir. Meyvede fruktoz ve glukozun temel tatlandırıcı şekerler arasında yer aldığı, sükrozun ise daha düşük düzeylerde bulunduğu bildirilmiştir (Ayaz ve Bertoft, 2001). Buna ek olarak ksiloza, mannoza ve ramnoza gibi bazı indirgen şekerlerin de meyve ekstraktlarında daha düşük oranlarda nicel olarak belirlendiği rapor edilmiştir (Abizov ve ark., 2008).

2.1.1 Polisakkaritler

Meyve, sebze, mantar ve tıbbi bitkilerden elde edilen polisakkaritlerin antiinflamatuvar, antioksidan, prebiyotik, antidiyabetik ve nöroprotektif etkiler dâhil olmak üzere çeşitli biyolojik aktiviteler sergileyebildiği bilinmektedir (Zhang ve ark., 2023). *E. angustifolia* meyvelerinden EAP-1a ve EAP-1b olarak adlandırılan polisakkarit fraksiyonlarının elde edildiği; bu fraksiyonların mannoz, ramnoz, glukoz, galaktoz, ksiloza ve arabinoz gibi monosakkaritlerden oluştuğu bildirilmiştir. Bu polisakkaritlerin RAW 264.7 makrofajlarında fagositozu ve nitrik oksit üretimini destekleyebildiği rapor edilmiştir (Du ve ark., 2016). Ayrıca söz konusu polisakkaritlerin antioksidan özellik gösterdiği ve bileşimlerinde ksiloza, glukoz, ramnoz, mannoz ve galaktozun belirgin şekilde yer aldığı ifade edilmiştir (Chen ve ark., 2014). Meyvede bulunan polisakkaritlerin önemli bir bölümünün suda çözünebilir nitelikte olduğu ve iyi bir emülsifiye edici aktivite sergileyebildiği de belirtilmektedir (Sharifian-Nejad ve Shekarchizadeh 2019).

2.2 Proteinler, Yağ Asitleri ve Lipitler

“Russian olive” meyvesinin, esansiyel ve esansiyel olmayan amino asitleri içeren bir protein kaynağı olarak değerlendirilebileceği; bu yönüyle besinsel açıdan dikkat çektiği bildirilmektedir (Abizov ve ark., 2008). Bununla birlikte, meyve, çiçek ve tohumların farklı yağ asitleri ve türevleri açısından da zengin olduğu rapor edilmektedir. Çiçeklerde serbest yağ asitlerinin belirgin olduğu; meyvenin ekzokarp kısmında ise palmitoleik asidin öne çıkabildiği ifade edilmiştir. Meyve pulpu ekstraktlarında farklı sınıflardan çok sayıda

yağ asidinin nicel olarak belirlendiği bildirilmektedir (Hamidpour ve ark., 2017).

Tohumlarda hem doymuş hem doymamış yağ asitlerinin yanı sıra glikolipitler ve fosfolipitler gibi lipid sınıflarının da bulunduğu; tohum yağında özellikle linoleik ve palmitik asidin tanımlandığı rapor edilmiştir (Hamidpour ve ark., 2017). Lipofilik bileşenler arasında, β -sitosterol ve asetat formunun meyve ve kabukta saptandığı, stigmasterolün ise kabukta bulunduğu belirtilmektedir. Yapraklarda yağ asitleri, triterpenler, steroller, serbest alkol ve esterler gibi çeşitli lipid bileşenlerinin varlığı bildirilmiştir. Ayrıca kabukta izokariofilen; çiçeklerin uçucu yağlarında limonen, nerolidol, skualen ve ursolik asit; yapraklarda ise α ve β -amirin gibi bileşiklerin izole edildiği rapor edilmiştir (Si ve ark., 2011).

2.3. Fenolik Bileşikler ve Flavonoidler

Fenolik bileşikler ve türevleri, *E. angustifolia*'nın farklı bitki kısımlarında yaygın biçimde dağılım göstermektedir. Ancak fenolik bileşiklerin ekstraktlardaki derişimi; bitkinin yaşı ve fizyolojik durumu ile örnekleme zamanı gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Literatürde, *E. angustifolia*'nın özellikle yaprak ve meyvelerinin fenolik bileşikler bakımından iyi bir kaynak olduğu; bu kısımlarda p-hidroksibenzoik asit, kafeik asit ve protokateşik asit gibi bileşiklerin öne çıktığı bildirilmektedir. Meyvelerde ayrıca 4-hidroksibenzoik asit, 4-hidroksisinnamik asit, benzoik asit, ferulik asit ve vanillik asit gibi farklı fenolik asitlerin de bulunduğu rapor edilmiştir (Ayaz ve Bertoft, 2001). Bununla uyumlu olarak, yaprakların toplam fenolik içeriğinin meyvelere kıyasla daha yüksek olduğuna işaret eden bulgular da mevcuttur (Carradori ve ark., 2020).

Flavonoidler ise düşük molekül ağırlıklı, yüksek antioksidan aktiviteye sahip polifenolik bileşikler olup sebze ve meyvelerde yaygın olarak bulunan ikincil metabolitlerdir (Okmen ve Turkcan, 2014). Bu bileşiklerin antioksidan ve antiinflamatuvar etkilerin yanı sıra hipokolesterolemik, antidiyabetik ve nöroprotektif özellikler gösterebildiği; ayrıca kanserin önlenmesiyle ilişkili süreçlerde rol oynayabileceği bildirilmektedir (Farzaei ve ark., 2019). *E. angustifolia*'nın yaprak, meyve ve çiçeklerinde flavanol, flavanon, proantosiyanidin, izoflavon ve antosiyanin sınıflarını kapsayan yüksek düzeyde flavonoid bulunduğu ifade edilmektedir (Hamidpour ve ark., 2019).

Yapraklarda (+)-gallokteşin, (+)-kateşin, (–)-epigallokteşin, (–)-epikateşin gibi kateşin türevleri ile kaempferol, kuersetin, luteolin ve izoramnetin gibi flavonoid aglikonlarının yanı sıra izoramnetin türevli çeşitli glikozitlerin de bulunduğu rapor edilmiştir (Hamidpour ve ark., 2019). Bunun yanında, daha önce bilinen flavonoidlerin yanı sıra bazı yeni/yeniden tanımlanan flavonoidlerin yapraklardan izole edildiği ve aynı moleküllerin meyvede de saptanabildiği bildirilmiştir (Yuca ve ark., 2021). Meyvelerde özellikle rutin,

eleagnosid, izoramnetin (3,5,7,4'-tetrahidroksi-3'-metoksi flavon) ve izoramnetin-3-O- β -galaktopiranozid gibi farklı flavonoidlerin varlığı rapor edilmiştir (Abizov ve ark., 2008). Ayrıca çiçek taç yapraklarının metanol ekstraktlarından, A-G olarak adlandırılan yedi yeni açillenmiş izoramnetin glikozidinin (elaegnositlerin) izole edildiği bildirilmektedir. Toplam flavonoid içeriği açısından ise yaprakların meyvelere kıyasla daha yüksek değerlere sahip olduğunu ifade edilmiştir (Carradori ve ark., 2020).

2.4 Alkaloidler

E. angustifolia'nın kök, kabuk ve toprak üstü kısımlarında farklı alkaloidlerin varlığı rapor edilmiştir. Bu bileşikler arasında yapısal olarak tetrahidroharmana benzeyen elaeagnin (ya da calligonin) türün en dikkat çekici alkaloidlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Tehranizadeh ve ark., 2016). Bunun yanı sıra, kabuktan 2-methyl-1,2,3,4-tetrahydro- β -carboline, 1,2-dihydroharmaline, dihydroharmane, 3,3-dimethyl-1,3-dihydro-indol-2-one, harmaine, harmol, N-methyl-1,2,3,4-tetrahydro- β -carboline, N-methyltetrahydroharmol, tetrahydroharmane, tetrahydroharmol ve 2,3,4,9-tetrahydro-1-methyl-1H-pyrido[3,4-b] indole gibi çeşitli β -karbolin türevlerinin tanımlandığı bildirilmektedir (Si ve ark., 2011). Bu bulgular, *E. angustifolia*'nın alkaloid profili açısından da kimyasal çeşitlilik sergilediğini göstermektedir.

2.5 Saponinler ve Tanenler

Saponinler ve tanenler; antihelmintik, hemostatik, antimikrobiyal, kemopreventif, anjiyogenez üzerinde etkili, analjezik, kardiyoprotektif, antitümör ve antiinflamatuvar aktiviteler dâhil olmak üzere farklı biyolojik etkilerle ilişkilendirilen fitokimyasallardır (Motevalian ve ark., 2017). *E. angustifolia*'da bu bileşiklerin düzeylerinin bitkinin organlarına göre değiştiği; özellikle meyvelerin saponinler yönünden belirgin miktarlar içerebildiği, tanenlerin ise en yüksek düzeyde kabukta bulunduğu ve bunu yapraklar ile yıllık sürgünlerin izlediği rapor edilmiştir (Hamidpour ve ark., 2017).

2.6 Vitaminler, Mineraller ve Diğer Besin Öğeleri

E. angustifolia, vitaminler ve mineraller başta olmak üzere pek çok besin öğesini ve lipofilik bileşeni içeren zengin bir kaynak olarak tanımlanmaktadır. Türün bileşiminde; steroller ve steroidler, alkanlar, polifenoller (deka-, undeka- ve dodekaiisoprenoller), trans-etilsinamat, sikloartenol, tokoferoller, triterpenler, aldehytler, sitrostadienol, 24-metilen-sikloartanol, C21-C31 hidrokarbonlar (özellikle C29), C16-C26 yağ alkolleri ile α ve β -amirin gibi bileşiklerin bulunduğu bildirilmiştir (Kiseleva ve Chindyaeva, 2011). Vitamin profili açısından ise provitamin A (β -karoten), B grubu vitaminler, askorbik asit (C vitamini) ve K vitamini gibi önemli vitaminlerin varlığına dikkat çekilmektedir. Mineral içerik bakımından potasyum, kalsiyum, sodyum ve fosfor gibi elementlerin anlamlı düzeylerde bulunabildiği; bu minerallerin

bolluğunun ise zamansal ve mekânsal olarak değişkenlik gösterebileceği rapor edilmiştir (Abizov ve ark., 2008).

3. Biyolojik Aktiviteler ve Etki Mekanizmaları

İğde üzerine yürütülen çalışmalarda; farklı çözücülerle hazırlanmış ekstraktlar, fraksiyonlar ve bazı izole bileşikler üzerinden antioksidan, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar etkiler başta olmak üzere geniş bir biyolojik aktivite yelpazesi rapor edilmiştir. Bu çeşitlilik, bitki kısmı–çözücü polaritesi–doz–model etkileşiminin yorumlarda kritik olduğunu göstermektedir (Okmen ve Turkcan, 2014).

Pek çok doğal ürün, farklı biyolojik aktivitelere sahip bileşikleri sentezleyebilmekte; bu etkiler büyük ölçüde içerdikleri biyoaktif bileşenlerden kaynaklanmaktadır (Mohammed ve ark., 2021). Bu kapsamda, literatürde *E. angustifolia* üzerine yürütülen biyolojik aktivite çalışmalarının sonuçları derlenmiştir. Çalışmalarda metanol, su, etanol, aseton, etil asetat, bütanol, petrol eteri, hekzan, yumuşak ekstrakt (soft extract), polisakkarit fraksiyonları, kloroform ve hidroalkolik ekstraktlar gibi farklı çözücü ve ekstraksiyon yaklaşımlarının kullanıldığı görülmektedir.

Genel olarak, *E. angustifolia*'nın farklı ekstraktlarının antioksidan, antimikrobiyal, antitümör/antikansere yönelik, insektisidal, antiinflamatuvar, anti-anjiyojenik, antinosiseptif ve antidiyabetik aktiviteler sergileyebildiği rapor edilmiştir. Bu bulguların İran, Türkiye, Romanya, Çin, Pakistan ve Afganistan gibi farklı coğrafi bölgelerden elde edilen örneklerde bildirildiği; dolayısıyla türün biyolojik etki potansiyelinin geniş bir coğrafi zeminde desteklendiği anlaşılmaktadır (Bucur ve ark., 2008; Si ve ark., 2011; Chen ve ark., 2014; Okmen ve Turkcan, 2014; Monjazez Marvdashti ve ark., 2024).

3.1 Tıbbi Kullanımların Genel Çerçevesi

Tıbbi bitkiler, çok çeşitli farmasötik özellikler gösterebilen değerli doğal bileşiklerin önemli kaynaklarıdır. Bu kapsamda antioksidan ve yara iyileşmesini destekleyici etkilerin yanı sıra; osteoartrit ve solunum yolu rahatsızlıklarında analjezik/antiinflamatuvar yaklaşımlar, antimikrobiyal etkinlik, antitümör ve antikanser potansiyel ile kardiyovasküler ve metabolik etkiler ve cinsel sağlığın desteklenmesi gibi farklı alanlarda bitkisel ürünlerin değerlendirilebildiği bildirilmektedir (Tehranizadeh ve ark., 2016).

E. angustifolia'nın tıbbi açıdan dikkat çekmesinde, ekstraktlarının zengin fitokimyasal bileşimi belirleyici görünmektedir. Literatürde, bitkiden elde edilen “Russian olive ekstraktı”nın; flavonoidler (özellikle açıl (acetyl) lenmiş flavonol glikozitleri), alkaloidler (harman, tetrahidroharman ve elaeagnin gibi), karbonhidratlar, vitamin ve mineraller, yağ asitleri ve lipitler ile steroller, saponinler ve tanenler gibi bileşik gruplarını içerdiği özetlenmek-

tedir. Bu bileşen profiliyle ilişkili olarak *E. angustifolia*'ya atfedilen başlıca tıbbi/işlevsel etkiler; yara iyileşmesini destekleyici, antibakteriyel, antifungal ve antioksidan özellikler; kas gevşetici etki, antiinflamatuvar ve ağrı azaltıcı potansiyel, gastroprotektif ve antiülser etkiler ile kan basıncının düzenlenmesine yönelik kardiyovasküler destekleyici etkiler şeklinde gruplandırılabilir. Bu çerçevede, *E. angustifolia* ve bileşenleri, farklı hastalıkların önlenmesi ya da baskılanmasına yönelik geleneksel kullanımları ile modern farmakolojik araştırmaların kesişiminde, çok yönlü bir doğal kaynak olarak değerlendirilmektedir (Mohammadhosseini ve ark., 2021).

3.2 Analjezik ve Antiinflamatuvar Etkiler

E. angustifolia'nın analjezik ve antiinflamatuvar potansiyeli, büyük ölçüde içerdiği polifenolik bileşiklerle ilişkilendirilmektedir. Kumarik asit, ferulik asit ve kaempferol gibi polifenollerin; inflamatuvar mediyatörlerin salınım ve üretimini (COX-1, COX-2, PGE2 ve nitrik oksit), bazı sinyal moleküllerini (IRAK4, Src ve Syk), proinflamatuvar sitokinleri (TNF- α ve interlökin-6) ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunu baskılamaya katkı sağlayabildiği rapor edilmiştir (Farahbakhsh ve ark., 2011). Bu bulgular, bitkinin inflamasyon yanıtını birden fazla basamak üzerinden modüle edebileceğine işaret etmektedir.

Mevcut veriler, *E. angustifolia* ekstraktlarında yer alan flavonoid ve fenolik bileşenlerin; siklooksijenaz (COX) ve lipooksijenaz gibi enzimatik yollar ile indüklenebilir nitrik oksit sentaz (iNOS) üzerinden etkiler gösterebileceğini, dolayısıyla prostanoidler, nitrik oksit ve lökotrienler gibi inflamasyonla ilişkili mediyatörlerin düzeylerini etkileyerek inflamatuvar süreci zayıflatabileceğini düşündürmektedir (Farahbakhsh ve ark., 2011). Aynı zamanda, bu bileşiklerin hücrel sinyal iletimini ve sitokin yanıtını düzenlemesi, antiinflamatuvar etkinin güçlenmesine katkı sağlayabilecek olası mekanizmalar arasında değerlendirilmektedir.

Deneyisel çalışmalar da bu yaklaşımı desteklemektedir. Motevalian ve ark., (2017), *E. angustifolia* meyve ekstraktının sıçan pati ödemi modelinde hem akut hem de kronik antiinflamatuvar etki gösterebildiğini ve bu etkinin farklı mekanizmalar üzerinden ortaya çıkabileceğini bildirmiştir. Benzer biçimde Ahmadiani ve ark., (2000) de *E. angustifolia* meyve ekstraktının antinosiseptif (ağrı azaltıcı) ve antiinflamatuvar aktivite sergileyebildiğini rapor etmiştir.

3.3 Osteoartrit Kullanım ve Klinik Bulgular

E. angustifolia ekstraktlarının ağrı azaltıcı ve kas gevşetici etkilerinin, osteoartrit hastalarında semptomatik rahatlama sağlayabildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, osteoartrit tedavisinde yalnızca kas gevşetme yaklaşımına uzun süreli olarak dayanmanın uygun olmadığı; özellikle diz osteo-

artritinde kuadriseps kaslarının güçlendirilmesinin tedavinin temel bileşenlerinden biri olduğu ve kas gevşemesinin bu hedefi destekleyecek şekilde dengeli biçimde ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Panahi ve ark., 2016).

DeneySEL ve klinik çalışmalar, *E. angustifolia* meyvesinden elde edilen preparatların osteoartrit belirtilerini hafifletme potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir. Örneğin, monosodyum iodoasetat ile osteoartrit oluşturulan fare modelinde meyveden elde edilen su ekstraktının; belirli matriks metalloproteinaz düzeylerini düşürdüğü ve histopatolojik bulguları iyileştirdiği rapor edilmiştir (Heydari Nasrabadi ve ark., 2022). Klinik düzeyde ise Nikniaz ve ark., (2014), diz osteoartriti olan kadınlarda *E. angustifolia* medullası ve bütün meyve tozlarının kullanımının; proinflatuar belirteçlerde (örn. TNF- α ve bazı metalloproteinazlar) azalma ile antiinflatuar sitokin IL-10 düzeyinde artışla ilişkili olabileceğini bildirmiştir. Benzer şekilde Karimifar ve ark., (2017), diz osteoartriti olan yetişkinlerde meyve su ekstraktının birkaç haftalık kullanımının; ağrı şiddeti ve fonksiyonel durum gibi klinik göstergelerde iyileşmelerle ilişkili olduğunu rapor etmiştir. Panahi ve ark., (2016) ile Nikniaz ve ark., (2014) bulguları birlikte değerlendirildiğinde, meyve ekstraktlarındaki bazı alkaloidlerin (harmine ve harmaline) ve polifenollerin oksidatif stresin azaltılması üzerinden sürece katkı sunabileceği ileri sürülmektedir.

3.4 Yara İyileşmesi ve Doku Onarımı

E. angustifolia ekstraktlarının yara iyileşmesiyle ilişkilendirilen çeşitli bileşenleri (özellikle A, B, K ve E vitaminleri) önemli düzeylerde içerebildiği bildirilmektedir (Natanzi ve ark., 2012; Hamidpour ve ark., 2019). Natanzi ve ark., (2012), meyveden elde edilen su ekstraktının deneysel deri yarası oluşturulan sıçanlarda hidrokspirolin içeriğini ve histolojik iyileşme skorlarını artırabildiğini rapor etmiştir. Ayrıca, çiçeklerden elde edilen “yumuşak ekstrakt”ın krem formülasyonu şeklinde uygulandığında, tavşanlarda skarlı deri üzerinde iyileşmeyi destekleyici etki gösterebildiği bildirilmiştir (Bucur ve ark., 2008). Genel olarak, *E. angustifolia* ekstraktlarının hemostaz, inflamatuvar yanıt, proliferasyon ve doku onarımı gibi yara iyileşmesinin temel evreleri üzerinde anlamlı etkiler oluşturabileceği değerlendirilmektedir (Bucur ve ark., 2008; Natanzi ve ark., 2012).

3.5 Antimikrobiyal Aktivite

E. angustifolia’nın yaprak, çiçek ve meyvesinden elde edilen ekstraktların hem bakterilere hem de mantarlara karşı antimikrobiyal aktivite gösterebildiği rapor edilmiştir. Türkiye’de yapılan bir çalışmada, çiçek, yaprak ve meyveden elde edilen metanolik fitokomplekslerin farklı bakterilere karşı etkinlik sergilediği; özellikle çiçek ekstraktının Gram-pozitif bakterilere karşı daha belirgin aktivite gösterebildiği ve bunu yaprak ile meyve ekstraktlarının izlediği bildirilmiştir (Incilay 2014). Bu farklılığın, çiçeklerde yaprak ve mey-

veye kıyasla daha yüksek olabilen uçucu bileşik içeriği (terpenler, alkoller, aldehitler, ketonlar ve esterler gibi) ile ilişkili olabileceği; söz konusu uçucu bileşiklerin antimikrobiyal etkiye katkı sağlayabildiği ifade edilmektedir.

Farklı polaritede fraksiyonlarla yürütülen bir çalışmada, tüm bitkiden elde edilen metanol ekstraktı ve fraksiyonlarının farklı patojenlere karşı değişen düzeylerde aktivite gösterdiği; etkinliğin hedef mikroorganizmaya ve fraksiyon tipine bağlı olarak belirgin şekilde farklılaştığı rapor edilmiştir. Bazı fraksiyonların belirli bakterilere karşı daha etkili olduğu; bazı fraksiyonlarda ise sınırlı ya da hiç etki görülmediği bildirilmiştir. Aynı çalışma kapsamında, ekstrakt/fraksiyonların bazı *Aspergillus* türlerine karşı da değişken antifungal aktivite sergileyebildiği ortaya konmuştur (Khan ve ark., 2016). Türkiye’de gerçekleştirilen bir başka araştırmada, yapraktan elde edilen metanol ekstraktının çeşitli patojenlere karşı antimikrobiyal etki gösterdiği ve en yüksek etkinin *Yersinia enterocolitica* üzerinde gözlemlendiği bildirilmiştir (Okmen ve Turkcan, 2014).

Bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, *E. angustifolia*’nın farklı bitki kısımlarından elde edilen ekstrakt ve fraksiyonların antimikrobiyal açıdan dikkate değer bir potansiyele sahip olabileceği; dolayısıyla hem veteriner hekimlikte (ör. mastitis gibi enfeksiyonlar) hem de insan sağlığında (ör. ağız/dental hijyen uygulamaları) destekleyici doğal ajan geliştirme çalışmalarında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir (Incilay 2014; Okmen ve Turkcan 2014; Khan ve ark., 2016).

Günümüzde mikrobiyal hastalıklarla mücadele giderek zorlaşmakta; bunun başlıca nedenleri arasında, bilinçsiz antibiyotik kullanımına bağlı olarak dirençli mikroorganizma sayısındaki artış gösterilmektedir. Bu durum, yeni antimikrobiyal ajanların keşfine yönelik araştırmaları hızlandırmıştır. Ayrıca sentetik ilaçların olası yan etkileri nedeniyle, doğal kaynaklı antimikrobiyal bileşiklere olan ilgi de artmaktadır (Sevindik ve ark., 2024).

3.6 Solunum Yolu Rahatsızlıkları

Halk hekimliğinde *E. angustifolia*’nın kabuk, yaprak, çiçek ve meyvesinden hazırlanan dekoksion ve infüzyonların solunum yolu yakınmalarında uzun süredir kullanıldığı bildirilmektedir. Bitkinin literatürde rapor edilen antimikrobiyal etkilerine ek olarak antiinflamatuvar ve antioksidan özellikler sergileyebilmesi, solunum yolu hastalıklarına yönelik nutrasötik bir aday olarak değerlendirilmesini destekleyen önemli bir gerekçe sunmaktadır. Nitekim *E. angustifolia* ekstraktlarının; aşırı mukus üretimi, hava yolu hiperreaktivitesi, nefes darlığı, boğaz ağrısı, grip/soğuk algınlığı, ateş, öksürük ve hışıltı gibi semptomların yönetiminde geleneksel olarak kullanılabildiği belirtilmektedir (Ge ve ark., 2009). Bu geleneksel kullanım, Mamashli ve ark., (2022) tarafından bildirilen güncel bulgularla da desteklenmekte; araştırmacılar *E. angustifolia* meyve su ekstraktının karragenanla indüklenen akut ak-

ciğer hasarında koruyucu etki gösterebildiğini ve bu etkinin IL-6, TNF- α düzeyleri ile oksidatif stresin azalmasıyla ilişkili olabileceğini rapor etmektedir.

3.7 Antioksidan Etkisi

Literatürde, *E. angustifolia*'nın farklı bitki kısımlarından elde edilen ekstraktların antioksidan kapasitesine ilişkin bulgular mevcuttur. DPPH ve FRAP gibi yaygın analiz yaklaşımlarıyla yürütülen çalışmalarda, özellikle tohum ve kabuk/soyma fraksiyonlarından elde edilen metanolik ekstraktların belirgin antioksidan özellik gösterdiği; tohum ekstraktlarının fenolik ve flavonoid içeriğinin daha yüksek olabilmesi nedeniyle antioksidan aktivitenin de genellikle daha güçlü seyrettiği rapor edilmiştir (Faramarz ve ark., 2015). Benzer şekilde, farklı çözücü sistemleriyle hazırlanan ekstraktların karşılaştırıldığı çalışmalarda, kabuk, yaprak ve mezokarp gibi fraksiyonlardan elde edilen bazı ekstraktların antioksidan kapasite açısından öne çıkabildiği belirtilmiştir (Yalcin ve Sogut, 2014).

Uygulama odaklı çalışmalar, *E. angustifolia*'nın gıda matrislerinde antioksidan kapasiteyi artırma potansiyeline de dikkat çekmektedir. Örneğin ekstraktların portakal suyuna ilavesiyle antioksidan kapasitenin yükseldiği bildirilmiştir (Sarvarian ve ark., 2022). Meyve unu kullanılarak üretilen krakerlerin, kontrol örneklerine kıyasla daha yüksek polifenol içeriği ve antioksidan etki sergilediği rapor edilmiştir (Incedayi ve Erol, 2023). Benzer biçimde, meyve ununun dondurma formülasyonlarına dahil edilmesinin kimyasal, duyu ve fiziksel özellikleri iyileştirmenin yanı sıra antioksidan kapasiteyi artırabildiği ifade edilmektedir (Çakmakçı ve ark., 2015). Bu bulgular, *E. angustifolia* ekstrakt ve unlarının nutrasötik ürün geliştirme süreçlerinde değerlendirilebileceğini düşündürmektedir.

Antioksidanlar, serbest radikallerin neden olduğu etkileri azaltmada rol oynayan bileşiklerdir. Serbest radikaller düşük düzeylerde her zaman zararlı olmayabilse de düzeyleri arttığında hücresel yapılarda hasara yol açabilmektedir. Serbest radikal yükünün yükselmesi durumunda endojen antioksidan savunma sistemi yetersiz kalabilir ve bunun sonucunda oksidatif stres gelişir. Oksidatif stresin; kanser, kardiyovasküler bozukluklar, multipl skleroz ve nörodejeneratif hastalıklar gibi ciddi klinik tablolarla ilişkilendirilebildiği bildirilmektedir. Bu nedenle, eksojen (takviye) antioksidanların oksidatif stresin olumsuz etkilerini azaltmada destekleyici bir yaklaşım sunabileceği; bitkilerin ise bu açıdan önemli ve erişilebilir doğal kaynaklar arasında yer aldığı vurgulanmaktadır (Mohammed ve ark., 2024).

3.8 Antimutajenik, Antikanser ve Anti-anjiyojenik Yaklaşımlar

E. angustifolia'nın metanolik ekstraktlarının antioksidan ve antiinflamatuar özellikleri sayesinde antitümör ve antimutajenik potansiyel taşıyabileceği bildirilmiştir (Amereh ve ark., 2017). Okmen ve Turkcan (2014), -S9

koşullarında Ames testi kullanarak *E. angustifolia*'nın metanolik ekstraktlarının mutajenik aktiviteyi baskılayabildiğini rapor etmiş ve bu bulgular antimutajenik etki açısından destekleyici bir kanıt olarak değerlendirilmiştir.

Antikanser potansiyele ilişkin çalışmalarda ise *E. angustifolia* su ekstraktının (EAE) bazı kanser hücre hatlarında seçici sitotoksik etki gösterebildiği; proliferasyonu baskıladığı ve apoptozu uyardığı bildirilmiştir. Bu süreçte pro-apoptotik belirteçlerde artış ve antiapoptotik proteinlerde azalma gibi bulguların yanı sıra p53 ile ilişkili düzenlemeler ve STAT3 fosforilasyonunun baskılanması gibi sinyal yollarının modülasyonu da rapor edilmiştir (Fouzat, 2021).

Benzer ekstraktın HER2-pozitif meme kanseri hücre hatlarında çoğalmayı ve koloni oluşumunu azaltabildiği; mezenkimal-epitelyal geçiş (MET) ile ilişkili bazı belirteçlerin düzenlenmesi üzerinden (ör. E-kaderin/ β -katenin artışı ve vimentin/fascin azalması) etkili olabileceği bildirilmiştir (Jabeen ve ark., 2020).

Ayrıca *E. angustifolia* meyve ekstraktlarının, KRAS mutasyonu taşıyan *Drosophila melanogaster* modelinde kolorektal kanser gelişimine karşı koruyucu/kemopreventif etki gösterebileceği; sıçanlarda diyetil nitrozamin ile indüklenen hepatokarsinogenezde ise inflamasyon ve oksidatif stres üzerinden koruyucu mekanizmalarla ilişkilendirilebileceği bildirilmiştir (Amereh ve ark., 2017; Fouzat 2021). Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, *E. angustifolia*'nın antimutajenik ve antikanser potansiyelinin umut verici olduğu; ancak etki mekanizmalarının netleştirilmesi ve klinik düzeyde doğrulanması için ileri çalışmalara ihtiyaç bulunduğu anlaşılmaktadır.

3.9 Kardiyovasküler ve Metabolik Etkiler

E. angustifolia ekstraktlarının antioksidan, serbest radikal süpürücü ve antiinflamatuvar özellikleri, kardiyovasküler hastalıklarda destekleyici bir yaklaşım olarak değerlendirilmesine zemin hazırlamaktadır. Literatürde, özellikle akut miyokard enfarktüsü ve iskemi/reperfüzyon hasarı gibi durumlarda oksidatif stres ve inflamasyonun belirleyici rolü göz önüne alındığında, *E. angustifolia*'nın bu süreçleri modüle edebilecek özellikler taşıdığı belirtilmektedir (Okmen ve Turkcan 2014). Nitekim yaprak ekstraktına ilişkin bir çalışmada, farklı fitokimyasalların insanlarda monoamin oksidaz A (MAO-A) aktif bölgesine bağlanabilmesiyle ilişkili olarak miyokard iskemi/reperfüzyon hasarına karşı koruyucu bir potansiyel ortaya konmuştur (Tehranizadeh ve ark., 2016).

Öte yandan, *E. angustifolia* ekstraktlarının oksidatif stresi hem doğrudan hem de endojen savunmayı güçlendirerek dolaylı biçimde baskılayabildiği; özellikle süperoksit dismutaz (SOD) aktivitesindeki artış üzerinden kalp dokusunun korunmasına ve iskemi/reperfüzyonla bozulan kardiyak fonk-

siyonların sürdürülmesine katkı sağlayabileceği rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2014).

Kardiyometabolik parametreler açısından, bütün meyve tozunun düzenli tüketiminin bazı gruplarda lipid profili üzerinde olumlu değişimlerle ilişkili olabileceğine dair klinik bulgular bulunmaktadır. Postmenopozal kadınlarda yürütülen bir çalışmada belirli bir süre boyunca günlük kullanımın LDL-kolesterol düzeylerinde azalma ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Shabani ve ark., 2021). Sağlıklı bireylerde yapılan bir başka çalışmada da *E. angustifolia* uygulamasının toplam kolesterol, LDL-kolesterol, trigliserit ve HDL-kolesterol gibi parametreler üzerinde olumlu yönde etkilerle ilişkilendirilebileceği ifade edilmiştir (Belarbi ve ark., 2011).

3.10 Gastrointestinal Etkiler

Literatürde *E. angustifolia*'nın gastrointestinal sistem üzerinde koruyucu ve semptom hafifletici etkiler gösterebileceğine ilişkin bulgular yer almaktadır. Bitkinin karotenoid içeriği ile meyveden elde edilen metanolik fraksiyonların, ülser oluşumuna karşı koruyucu bir potansiyele sahip olabileceği belirtilmiştir. Bunun yanı sıra ekstraktların, antioksidan mekanizmalar üzerinden gastrointestinal düz kas kasılmalarını gevşetici yönde etkileyerek mide mukozasının bütünlüğünü destekleyebileceği; dolayısıyla mide yüzeyinde koruyucu bir bariyer etkisine katkı sunabileceği ifade edilmektedir (Tehrani-zadeh ve ark., 2016).

Geleneksel ve bölgesel uygulamalara ilişkin veriler de bu yaklaşımı destekler niteliktedir. Örneğin Ermenistan'da *E. angustifolia* meyve ekstraktından (özellikle polifenolik bileşenlerden) türetilen "pshatin" isimli preparatın kolit ve bazı gastrointestinal sistem hastalıklarında kullanıldığı bildirilmektedir. Ayrıca yaprak ve meyve ekstraktlarının bulantı, gaz/şişkinlik ve kusma gibi yakınmaların giderilmesinde yararlı olabileceğine dair kullanım bildirimleri mevcuttur (Hamidpour ve ark., 2017, 2019).

3.11 Diğer Bildirilen Biyolojik Etkiler

Literatürde *E. angustifolia*'nın yalnızca antioksidan ve antimikrobiyal etkilerle sınırlı kalmadığı; farklı biyolojik aktivite alanlarında da dikkat çekici bulgular sunduğu görülmektedir. Türkiye'de yürütülen bir çalışmada, *E. angustifolia*'dan elde edilen metanol ekstraktının Ames testi ile antimutajenik potansiyeli değerlendirilmiş; özellikle belirli mutajenik ajanlara karşı inhibisyon sağlayabildiği ve *S. typhimurium* üzerinde mutajeniteyi azaltma yönünde orta düzeyde bir etki gösterebileceği rapor edilmiştir (Okmen ve Turkcan, 2014). Çin'de gerçekleştirilen bir çalışmada ise etil asetat ekstraktının inhibisyon etkisinin konsantrasyona ve ekstraktın polaritesine bağlı olarak değiştiği; daha yüksek konsantrasyon ve daha güçlü polarite koşullarında etkinliğin arttığı bildirilmiştir (Ya ve ark., 2014).

Bunun yanında, Pakistan'da yapılan bir çalışmada farklı çözücülerle elde edilen ekstraktların bazı depo zararlısı böcek türleri üzerinde insektisidal etki oluşturabildiği ortaya konmuştur (Khan ve ark., 2016). İran'da yürütülen araştırmalarda, metanol ve sulu ekstraktların insan meme kanseri hücre hattı (MCF-7) üzerinde antikanser potansiyel gösterebildiği rapor edilmiş; ayrıca hidroalkolik ekstraktın antiinflamatuvar etki bakımından değerlendirildiği çalışmalarda inflamasyonun baskılanmasına yönelik bulgular bildirilmiştir (Motevalian ve ark., 2017; Naseri ve ark., 2023).

Anti-anjiyojenik etki yönünden yapılan bir başka İran çalışması, hidroalkolik ekstraktın ve fraksiyonlarının endotel hücreleri üzerinden anjiyogenez sürecini baskılama potansiyeline sahip olabileceğini göstermiştir (Badrhaddad ve ark., 2012). Ayrıca ağrı ile ilişkili mekanizmalar açısından, fare modellerinde yürütülen çalışmalarda farklı ekstrakt/fraksiyonların antinositif aktivite sergileyerek ağrı eşiğini artırabildiği ve bu etkinin uygulama biçimi ile fraksiyon kompozisyonuna bağlı olarak değişebildiği bildirilmiştir (Ramezani ve ark., 2001). Diyabetik modellerde gerçekleştirilen bir çalışmada ise *E. angustifolia*'nın sulu alkollü ekstraktlarının kan şekeri düzeyleri ve glukoz toleransı üzerinde iyileştirici yönde etkiler gösterebildiği rapor edilmiştir (Sadat ve ark., 2020).

Genel olarak bu bulgular, *E. angustifolia*'nın antioksidan ve antimikrobiyal özelliklerine ek olarak antimutajenik, insektisidal, antikanser, antiinflamatuvar, anti-anjiyojenik, antinositif ve antidiyabetik gibi geniş bir biyolojik aktivite spektrumuna sahip olabileceğini düşündürmektedir. Farklı ekstraksiyon yaklaşımlarıyla elde edilen ekstrakt ve fraksiyonların mutajeniteyi azaltma, tümör hücre proliferasyonunu baskılama, inflamasyonu hafifletme, ağrı eşiğini yükseltme ve diyabetik koşullarda metabolik parametreleri iyileştirme gibi etkilerle ilişkilendirilmesi, *E. angustifolia*'nın tıbbi uygulamalar ve farmakolojik araştırmalar açısından umut vadeden doğal bir kaynak olarak değerlendirilmesini desteklemektedir (Okmen ve Turkcan 2014; Ya ve ark., 2014; Khan ve ark., 2016; Ramezani ve ark., 2001; Sadat ve ark., 2020; Naseri ve ark., 2023).

4. Kullanım Alanları: Gelenekselden Günümüze Uygulamalar ve Çevresel Yaklaşımlar

İğdenin (*Elaeagnus angustifolia* L.) kullanım alanları yalnızca geleneksel tıbbi uygulamalarla sınırlı değildir. Tür; farklı bitki kısımlarına dayalı etnobotanik kullanımlarının yanı sıra fonksiyonel gıda ve nutrasötik ürün geliştirme, kozmesötik/topikal formülasyonlar ve çevresel uygulamalar (azot fiksasyonu, erozyon kontrolü, biyomonitöring ve biyoabsorban) bağlamında çok yönlü bir değer zinciri sunabilmektedir (Nistratov ve ark., 2020).

4.1. Geleneksel/Etnobotanik Kullanımlar

Literatürde *E. angustifolia*'nın geleneksel kullanımında meyve, çiçek, yaprak ve tohum gibi farklı bitki kısımlarının öne çıktığı görülmektedir. Meyve kısmının tonik amaçlı kullanımın yanı sıra katarakt, ateş düşürücü ve antidiyareik etki, neoplastik durumlar, böbrek hastalıkları, Alzheimer ve Parkinson hastalıkları, dizanteri, astım, romatoid artrit, tetanoz, sarılık, kardiyovasküler hastalıklar, kas gevşetici etki, prenatal döneme ilişkin güçlükler ve gastrointestinal ülserler gibi çok çeşitli durumlarda geleneksel olarak kullanıldığı bildirilmiştir (Hamidpour ve ark., 2019). Çiçek kısmının diyare ve diüretik etki, ateş düşürücü ajan olarak kullanım, yara iyileşmesi, astım ve öksürük gibi solunum yolu yakınmaları, sarılık, romatoid artrit, bulantı ve tonik amaçlarla değerlendirildiği rapor edilmiştir. Yaprakların ise astım, ateş düşürücü etki, öksürük, bulantı, diyare, sarılık, romatoid artrit, yara iyileşmesi ve epilepsi gibi durumlarda kullanıldığı belirtilmektedir (Tehranizadeh ve ark., 2016; Hamidpour ve ark., 2019). Son olarak, tohumların tonik, ateş düşürücü ve kas gevşetici amaçlarla kullanıldığı bildirilmiştir (Torbatı ve ark., 2016; Hamidpour ve ark., 2019).

4.2. Gıda ve Nutrasötik Ürün Geliştirme

Uygulama odaklı çalışmalar, iğde ekstrakt ve unlarının gıda matrislerinde antioksidan kapasiteyi artırma potansiyeline işaret etmektedir. Ekstrakt ilavesiyle portakal suyunun antioksidan kapasitesinin yükseldiği; iğde meyve unuyla üretilen krakerlerde polifenol içeriği ve antioksidan etkinin artabildiği rapor edilmiştir (Sarvarian ve ark., 2022; Incedayi ve Erol 2023). Benzer şekilde, dondurma formülasyonlarında iğde meyve unu kullanımının kimyasal, duyu ve fiziksel parametreleri iyileştirirken antioksidan kapasiteyi artırdığı bildirilmiştir (Çakmakçı ve ark., 2015).

4.3. Kozmesötik Yaklaşımlar ve Topikal Formülasyonlar

Meyve su ekstraktının deneysel yara modellerinde iyileşme parametrelerini olumlu etkileyebildiğini bildiren çalışmalar ve çiçek ekstraktına dayalı krem formülasyonu örnekleri, iğdenin kozmesötik geliştirmede aday olabileceğini düşündürmektedir (Bucur ve ark., 2008; Natanzi ve ark., 2012). Bununla birlikte, uçucu yağ bileşimi ve bireysel duyarlılık değişkenliği nedeniyle güvenlik değerlendirmelerinin formülasyon tasarımının ayrılmaz bir parçası olması gerektiği vurgulanmaktadır (Farzaei ve ark., 2019).

4.4. Çevresel ve Tarımsal Uygulamalar

E. angustifolia; yem ve gıda sağlamanın yanı sıra barınma (yuvalama) olanağı sunması, rüzgâr kıran olarak işlev görmesi ve erozyon kontrolüne katkı sağlayabilmesi nedeniyle ekosistem hizmetleri açısından önem taşımaktadır (Katz ve Shafroth 2003). Sürdürülebilir tarım bağlamında türün stres koşullarına toleranslı yapısı; Pb, Cd, Zn, Ni ve Hg gibi toksik ağır metallerin

biyo-adsorpsiyon yoluyla tutulmasına katkı sunabilmesi ve meyve tozunun biyoabsorban özellik gösterebilmesi nedeniyle kirlenmiş/bozulmuş alanların iyileştirilmesinde değerlendirilebileceğini düşündürmektedir (Sardar ve ark., 2013). Yaprakların yüksek azot-lignin içeriği ve biyobozunur yapısı biyogübre potansiyelini desteklerken (de Castro ve ark., 1990), Frankia ile simbiyoz üzerinden atmosferik azot fiksasyonu özellikle besin maddesince fakir veya tuzluluk sorunu olan koşullarda toprak verimliliğinin artırılmasına katkı sunabilmektedir (Khamzina ve ark., 2009).

4.5. Biyolojik İnsektisit Olarak Kullanım

Depolanmış ürün zararlılarına karşı sentetik insektisitlerin çevre ve sağlık riskleri, bitkisel kaynaklı alternatiflere ilgiyi artırmaktadır. İğdenin farklı kısımlarından elde edilen ekstraktların, *Ephestia cautella* ve *Tribolium castaneum* gibi zararlılar üzerinde insektisidal etki gösterebildiği rapor edilmiştir (Khan ve ark., 2016).

4.6. Standardizasyon, Kalite Kontrol ve Ürünleştirme Notları

Bitkisel kaynaklı ürünlerin gıda ya da takviye edici gıda olarak değerlendirilmesinde standart ham madde tanımı ve tekrarlanabilir ekstraksiyon protokolleri temel gerekliliklerdir. *E. angustifolia* için bitki kısmı (meyve/çiçek/yaprak/tohum), hasat zamanı, ön işlemler, çözücü seçimi ve hedef bileşik profile dayalı standardizasyon; biyolojik etkinliğin tutarlılığı açısından kritik görülmektedir. Klinik verilerin sınırlılığı ve farklı formların (ekstrakt/toz/krem) doz-yanıt ilişkilerindeki belirsizlikler ise ürünleştirme sürecinde çok disiplinli değerlendirme ihtiyacını artırmaktadır (Arab ve ark., 2022).

5. Yan Etkiler, Güvenlik ve Dikkat Noktaları

Çalışma temelli değerlendirmeler, *E. angustifolia* ekstraktlarının geniş bir kullanım aralığında belirgin olumsuz etki, gelişim geriliği veya malformasyon gibi sonuçlarla ilişkilendirilmediğini; genel olarak iyi tolere edilebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte bitkinin polenlerinin alerjenik özellik gösterebileceği ve bazı bireylerde burun irritasyonu gibi semptomları tetikleyebileceği belirtilmektedir (Hamidpour ve ark., 2017).

Öte yandan, yaprak ve çiçek uçucu yağlarında yüksek düzeyde bulunabildiği bildirilen E-etil sinnamatin, güçlü “antifeeding”, insektisidal ve nematisidal özellikler sergileyebildiği; ancak bu bileşiğin memelilerde veya insanlarda belirgin bir yan etki oluşturduğuna dair bulgu bulunmadığı rapor edilmiştir (Torbatı ve ark., 2016). Ayrıca *E. angustifolia*’nın sulu ve etanolü ekstraktlarının kas gevşetici özellikleri olduğu belirtilmekle birlikte, özellikle osteoartrit bağlamında uzun süreli kullanımın uygun olmayabileceği; çünkü tedavide kuadriseps kaslarının güçlendirilmesinin temel hedeflerden biri olduğu vurgulanmaktadır (Panahi ve ark., 2016). Gebelik açısından değerlendirildiğinde, *E. angustifolia* meyvesinin sulu ekstraktının gebe farelerde

güvenli ve patojenik olmayan bir profil sergilediği bildirilmiştir (Farzaei ve ark., 2015).

Dikkat çekici bir diğer nokta, *E. angustifolia* ekstraktlarının bazı kemo-terapötiklerin (ör. sisplatin) yan etkilerini azaltma ve etkinliğini artırma potansiyeline ilişkin ön bulguların bulunmasıdır (Zakaria ve ark., 2023). Ayrıca meyve ekstraktının glioblastoma hücre hatlarında sitotoksik ve antiproliferatif etki gösterebildiği, normal hücreler üzerinde ise toksisitenin düşük ya da minimal olabileceği ifade edilmektedir (Arab ve ark., 2022; Zakaria ve ark., 2023). Bununla birlikte antikanser etkinliğin ekstraktın türüne ve derişimine bağlı olarak değişebileceği; bu nedenle olası yan etkiler, toksisite, uygun doz aralığı ve uzun dönem güvenlilik için daha kapsamlı klinik çalışmalara ihtiyaç bulunduğu açıkça belirtilmelidir (Arab ve ark., 2022).

Gıda uygulamaları özelinde, yüksek polifenol ve tanen içeriğinin bazı ürünlerde acılık/büzücülük algısını artırabileceği; ayrıca uçucu yağ bileşenlerinin bireysel duyarlılıklara göre farklı tolerans profilleri oluşturabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Takviye ürünlerde ise eşzamanlı ilaç kullanımı ve kronik hastalığı bulunan bireylerde olası etkileşimler açısından klinik danışmanlık gerekliliği vurgulanmalıdır.

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

E. angustifolia; flavonoidler, fenolik asitler, tanenler, alkaloidler, polisakkaritler, suda ve yağda çözünen vitaminler, mineraller ve lipitler gibi çok sayıda biyoaktif bileşen bakımından zengin olması nedeniyle insan sağlığının desteklenmesinde dikkat çekici bir potansiyel taşımaktadır. Meyve suları, fırıncılık ürünleri ve dondurma gibi gıda matrislerine dahil edilebilmesi; sağlık yararları güçlendirilmiş fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Bununla birlikte, ekstraksiyon süreçlerinin standardizasyonu, optimum hasat zamanının belirlenmesi ve kalite kontrol parametrelerinin tanımlanması; ürün tutarlılığı ve etkinliğin güvence altına alınmasında temel zorluklar arasında yer almaktadır. Ayrıca iğdenin katma değerli değerlendirilmesi için maliyet-etkin ekstraksiyon yöntemleri ve verimli işleme tekniklerinin geliştirilmesi, ekonomik uygulanabilirlik açısından kritik önemdedir.

Preklinik ve klinik veriler, *E. angustifolia*'nın özellikle inflamasyon ve oksidatif stresle karakterize patolojik durumların yönetiminde nutrasötik geliştirme açısından umut vadeden bir kaynak olabileceğini; başta kardiyovasküler ve osteoartiküler hastalıklar olmak üzere çeşitli alanlarda değerlendirilme potansiyeli taşıdığını düşündürmektedir. Ancak terapötik etki için optimal dozun belirlenmesi ve olası yan etkilerden kaçınacak güvenli kullanım çerçevesinin oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca ön veriler, *E. angustifolia* fitokomplekslerinin kozmesötik alanda da potansiyel kullanımına işaret etse de etkinlik ve güvenliliğin kanıtlanması için güçlü bilimsel kanıta dayalı çalışmalara ihtiyaç vardır. Gelecekte, bu bitkinin zengin fitokimyasal profili

nedeniyle yeni ortaya çıkan hastalıklarla mücadelede olası rolünün araştırılması da önem taşımaktadır. Sonuç olarak, farklı hastalıklarda farklı ekstrakt türleri ve konsantrasyonlarının değerlendirildiği, iyi tasarlanmış klinik çalışmalar hem etki mekanizmalarının aydınlatılması hem de güvenli/etkin kullanımının netleştirilmesi açısından belirleyici olacaktır.

Kaynaklar

- Abizov, E., Tolkachev, O., Mal'Tsev, S., & Abizova, E. (2008). Composition of Biologically Active Substances Isolated From the Fruits of Russian Olive (*Elaeagnus angustifolia*) Introduced in the European Part of Russia. *Pharmaceutical Chemistry Journal* 42(12), 696–698.
- Ahmadiani, A., Hosseiny, J., Semnanian, S., et al. (2000). Antinociceptive and Anti-Inflammatory Effects of *Elaeagnus angustifolia* Fruit Extract. *Journal of Ethnopharmacology* 72, no. 1–2, 287–292.
- Amereh, Z., Hatami, N., Shirazi, F. H., et al. (2017). Cancer Chemoprevention by Oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) Fruit Extract in a Model of Hepatocellular Carcinoma Induced by Diethylnitrosamine in Rats. *EXCLI Journal* 16, 1046–1056.
- Arab, S., Bahraminasab, M., Yazdani, A., & Abdolshahi, A. (2022). Effects of Whole Fruit Extract of *Elaeagnus angustifolia* L. on Glioblastoma Cell Lines. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences* 11(5), e4314.
- Ayaz, F. A., & Bertoft, E. (2001). Sugar and Phenolic Acid Composition of Stored Commercial Oleaster Fruits. *Journal of Food Composition and Analysis* 14(5), 505–511.
- Badrhadad, A., Kh, P., & Mansouri, K. (2012). In vitro anti-angiogenic activity fractions from hydroalcoholic extract of *Elaeagnus angustifolia* L. flower and *Nepeta crispa* L. arial part. *J Med Plant Res* 6, 4633–4639.
- Belarbi, M., Bendimerad, S., Sour, S., et al. (2011). Oleaster Oil Positively Modulates Plasma Lipids in Humans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59(16), 8667–8669.
- Bucur, L., Taralunga, G., Alexandrescu, R., Negreanu, T., & Istudor, V. (2008). Evaluation of Biological Activity of a Dermatological Preparation With *elaegnus angustifolia* Flowers Soft Extract. *Revista Medico-Chirurgicală a Societății de Medici și Naturaliști din Iași* 112(4), 1098–1103.
- Çakmakçı, S., Topdaş, E. F., Kalın, P., et al. (2015). Antioxidant Capacity and Functionality of Oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) Flour and Crust in a New Kind of Fruity Ice Cream. *International Journal of Food Science & Technology* 50(2), 472–481.
- Carradori, S., Cairone, F., Garzoli, S., Fabrizi, G., Iazzetti, A., Giusti, A. M.,... & Cesa, S (2020). Phytocomplex characterization and biological evaluation of powdered fruits and leaves from *Elaeagnus angustifolia*. *Molecules*, 25(9), 2021.
- Chen, Q., Chen, J., Du, H., et al. (2014). Structural Characterization and Antioxidant Activities of Polysaccharides Extracted From the Pulp of *Elaeagnus angustifolia* L. *International Journal of Molecular Sciences* 15(7), 11446–11455.
- Comlekcioglu, N. (2019). Bioactive compounds and antioxidant activity in leaves of endemic and native *Isatis* spp in Turkey. *Braz Arch Biol Technol* 62, e19180330.
- de Castro, F. B., Aranda, Y., & Schmitz, M. F. (1990). Acetylene-Reducing Activity

- and Nitrogen Inputs in a Bluff of *Elaeagnus angustifolia* L. *Orsis: Organismes i Sistemes* 5, 85–89.
- Dogan M, Mohammed FS, Uysal I, Mencik K, Kına E, Pehlivan M, Sevindik M (2023). Total antioxidant status, antimicrobial and antiproliferative potentials of *Viola odorata* (Fragrant Violet). *J Fac Pharm Ankara Univ* 47(3), 784–791.
- Du, H., Chen, J., Tian, S., et al. (2016). Extraction Optimization, Preliminary Characterization and Immunological Activities In Vitro of Polysaccharides From *Elaeagnus angustifolia* L. Pulp. *Carbohydrate Polymers* 151, 348–357.
- El-Chaghaby GA, Mohammed FS, Rashad S, Uysal I, Koçer O, Lekesiz Ö, Dogan M, , Şabik AE, Sevindik M (2024). Genus *Hypericum*: General properties, chemical contents and biological activities. *Egypt J Bot* 64(1), 1–26.
- Farahbakhsh, S., Arbabian, S., Emami, F., et al. (2011). Inhibition of Cyclooxygenase Type 1 and 2 Enzyme by Aqueous Extract of *Elaeagnus angustifolia* in Mice. *Basic and Clinical Neuroscience* 2(2), 31–37.
- Faramarz, S., Dehghan, G., & Jahanban-Esfahlan, A. (2015). Antioxidants in Different Parts of Oleaster as a Function of Genotype. *BioImpacts: BI* 5(2), 79.
- Farzaei, M. H., Singh, A. K., Kumar, R., Croley, C. R., Pandey, A. K., Coy-Barrera, E.,... & Bishayee, A (2019). Targeting inflammation by flavonoids: novel therapeutic strategy for metabolic disorders. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4957.
- Farzaei, M. H., Bahramsoltani, R., Abbasabadi, Z., & Rahimi, R. (2015). A Comprehensive Review on Phytochemical and Pharmacological Aspects of *Elaeagnus angustifolia* L. *Journal of Pharmacy and Pharmacology* 67(11), 1467–1480.
- Fonia, A., White, I. R., & White, J. M. (2009). Allergic Contact Dermatitis to *Elaeagnus* Plant (Oleaster). *Contact Dermatitis* 60(3), 178–179.
- Fouzat, A (2021). *Elaeagnus angustifolia* Extract Inhabits Cell Invasion of Human Colorectal Cancer Cells and Increases the Survival Rate of the Drosophila Colon Cancer Model. Qatar University Press.
- Ge, Y., Liu, J., & Su, D. (2009). In Vivo Evaluation of the Anti-Asthmatic, Antitussive and Expectorant Activities of Extract and Fractions From *Elaeagnus pungens* Leaf. *Journal of Ethnopharmacology* 126(3), 538–542.
- Hällzon, P., Ötkür, Z., & Svanberg, I. (2022). Ethnobotany and Utilization of the Oleaster, *Elaeagnus angustifolia* L.(fam. *Elaeagnaceae*), in Eastern Turkestan. *Orient Suecana* 71, 38–61.
- Hamidpour, R., Hamidpour, S., & Doostmohamadi, P. (2019). Chemistry, Pharmacology and Medicinal Property of Russian Olive (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Cancer Science & Research* 6, 1–7.
- Hamidpour, R., Hamidpour, S., Hamidpour, M., et al. (2017). Russian Olive (*Elaeagnus angustifolia* L.): From a Variety of Traditional Medicinal Applications to Its Novel Roles as Active Antioxidant, Anti-Inflammatory, Anti-Mutagenic and Analgesic Agent. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 7(1), 24–29.

- Heydari Nasrabadi, M., Parsivand, M., Mohammadi, N., & N. Asghari Moghaddam (2022). Comparison of *Elaeagnus angustifolia* L. Extract and Quercetin on Mouse Model of Knee Osteoarthritis. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine* 13(2), 100529.
- Incedayi, B., & Erol, N. T. (2023). Assessment of the Bioaccessibility of *Elaeagnus angustifolia* L. Flour and Its Use in Cracker Formulation. *Plant Foods for Human Nutrition* 78(1), 201–206.
- Incilay, G (2014). Volatile Composition, Antimicrobial and Antioxidant Properties of Different Parts From *Elaeagnus angustifolia* L. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 17(6), 1187–1202.
- Jabeen, A., Sharma, A., Gupta, I., et al. (2020). *Elaeagnus angustifolia* Plant Extract Inhibits Epithelial-Mesenchymal Transition and Induces Apoptosis via HER2 Inactivation and JNK Pathway in HER2-Positive Breast Cancer Cells. *Molecules* 25(18), 4240.
- Karcioglu, L., Tanis, H., Comlekcioglu, N., Diraz, E., Kirecci, E., & Aygan, A. (2011). Antimicrobial activity of *Salvia trichoclada* in southern Turkey. *Int J Agric Biol* 13(1), 134–136.
- Karimifar, M., Soltani, R., Hajhashemi, V., & Sarrafchi, S. (2017). Evaluation of the Effect of *Elaeagnus angustifolia* Alone and Combined With *Boswellia Thurifera* Compared With Ibuprofen in Patients With Knee Osteoarthritis: A Randomized Double-Blind Controlled Clinical Trial. *Clinical Rheumatology* 36(8), 1849–1853.
- Katz, G. L., & Shafroth, P. B. (2003). Biology, Ecology and Management of *Elaeagnus angustifolia* L. (Russian Olive) in Western North America. *Wetlands* 23(4), 763–777.
- Khamzina, A., Lamers, J. P., & Vlek, P. L. (2009). Nitrogen Fixation by *Elaeagnus angustifolia* in the Reclamation of Degraded Croplands of Central Asia. *Tree Physiology* 29(6), 799–808.
- Khan, S. U., Khan, A. U., Shah, A. U., et al. (2016). Heavy Metals Content, Phytochemical Composition, Antimicrobial and Insecticidal Evaluation of *Elaeagnus angustifolia*. *Toxicology and Industrial Health* 32(1), 154–161.
- Kiseleva, T., & Chindyaeva, L. (2011). Biology of Oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) at the Northeastern Limit of Its Range. *Contemporary Problems of Ecology* 4, 218–222.
- Korkmaz, N., Dayangaç, A., & Sevindik, M. (2021). Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of *Galium aparine*. *J Fac Pharm Ankara Univ* 45(3), 554–564.
- Mamashli, M., Nasser, S., Mohammadi, Y., Ayati, S., & Zarban, A. (2022). Anti-Inflammatory Effects of N-Acetylcysteine and *Elaeagnus angustifolia* Extract on Acute Lung Injury Induced by Lambda-Carrageenan in Rat. *Inflammopharmacology* 30(5), 1759–1768.

- Mohammadhosseini, M., Frezza, C., Venditti, A., & Sarker, S. D. (2021). A Systematic Review on Phytochemistry, Ethnobotany and Biological Activities of the Genus *Bunium* L. *Chemistry & Biodiversity* 18(11), e2100317.
- Mohammed FS, Günel S, Pehlivan M, Dogan M, Sevindik M, Akgül H ~ (2020). Phenolic content, antioxidant and antimicrobial potential of endemic *Ferulago platycarpa*. *Gazi Univ J Sci* 33(4), 670–677.
- Mohammed FS, Pehlivan M, Sevindik E, Akgul H, Sevindik M, Bozgeyik I, Yumrutas O (2021). Pharmacological properties of edible *Asparagus acutifolius* and *Asparagus officinalis* collected from North Iraq and Turkey (Hatay). *Acta Aliment* 50(1), 136–143.
- Mohammed FS, Sevindik M, Uysal 'I, Çesko C, Koraqi H (2024). Chemical composition, biological activities, uses, nutritional and mineral contents of cumin (*Cuminum cyminum*). *Meas Food*.
- Monjazebe Marvdashti, L., Mohammadbeigi, M., Arab, S., Ebrahimi, A., Rezaei, A., & Abdolshahi, A. (2024). *Elaeagnus angustifolia* L. Whole Fruit Ethanolic Extract: Phytochemical Composition and Antimicrobial Effects. *J Chem Health Risk* 1(1), 117.
- Motevalian, M., Shiri, M., Shiri, S., Shiri, Z., & Shiri, H. (2017). Anti-Inflammatory Activity of *Elaeagnus angustifolia* Fruit Extract on Rat Paw Edema. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 28(4), 377–381.
- Naseri, Z., Piri, K., Naseri, M., & Nuri, S. (2023). Anticancer, antioxidant and antibacterial activities of extracts from *Scrophularia striata* and *Elaeagnus angustifolia*, growing in Ilam and Kurdistan provinces in Iran. *Plant Sci Today* 10(1), 152–165.
- Natanzi, M. M., Pasalar, P., Kamalinejad, M., et al. (2012). Effect of Aqueous Extract of *Elaeagnus angustifolia* Fruit on Experimental Cutaneous Wound Healing in Rats. *Acta Medica Iranica* 50(9), 589–596.
- Nikniaz, Z., Mahdavi, R., Nikniaz, L., Ebrahimi, A., & Ostadrahimi, A. (2016). Effects of *Elaeagnus angustifolia* L. on Lipid Profile and Atherogenic Indices in Obese Females: A Randomized Controlled Clinical Trial. *Journal of Dietary Supplements* 13(6), 595–606.
- Okmen, G. & Turkcan, O. (2014). A study on antimicrobial, antioxidant and antimutagenic activities of *Elaeagnus angustifolia* L. leaves. *African J Tradit Complementary Altern Med* 11(1), 116–120.
- Özer, Z., Kiliç, T., Selvi, S., & Pasa, C. (2018). Effect of different drying methods and development stages on the essential oil chemical composition of aerial parts of *Origanum vulgare* L. subsp. *hirtum* (link) Letsw. *J Essent Oil Bearing Plants* 21(5), 1403–1409.
- Panahi, Y., Alishiri, G. H., Bayat, N., Hosseini, S. M., & Sahebkar, A. (2016). Efficacy of *Elaeagnus angustifolia* Extract in the Treatment of Knee Osteoarthritis: A Randomized Controlled Trial. *EXCLI Journal* 15, 203–210.

- Ramezani, M., Hosseinzadeh, H., & Daneshmand, N. (2001). Antinociceptive effect of *Elaeagnus angustifolia* fruit seeds in mice. *Fitoterapia* 72(3), 255–262.
- Sadat, H., Alami, K., & Mousavi, S. Y. (2020). Effect of Afghan Senjed (*Elaeagnus angustifolia* L.) leaves aqueous alcoholic extract on blood glucose level of diabetic rats. *Pharmacogn J.*
- Sahan, Y., Gocmen, D., Cansev, A., et al. (2015). Chemical and Techno-Functional Properties of Flours From Peeled and Unpeeled Oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality* 88, 34–41.
- Sardar, K., Ali, S., Hameed, S., et al. (2013). Heavy Metals Contamination and What Are the Impacts on Living Organisms. *Greener Journal of Environmental Management Public Safety* 2(4), 172–179.
- Sarvarian, M., Jafarpour, A., Awuchi, C. G., Adeleye, A. O., & Okpala, C. O. R. (2022). Changes in Physicochemical, Free Radical Activity, Total Phenolic and Sensory Properties of Orange (*Citrus sinensis* L.) Juice Fortified With Different Oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) Extracts. *Molecules* 27(5), 1530.
- Sevindik M, Gürgen A, Khassanov VT, Bal C (2024). Biological activities of ethanol extracts of *Hericium erinaceus* obtained as a result of optimization analysis. *Foods* 13(10), 1560.
- Shabani, M., Rezaei, A., Badehnoosh, B., et al. (2021). The Effects of *Elaeagnus angustifolia* L. on Lipid and Glycaemic Profiles and Cardiovascular Function in Menopausal Women: A Double-Blind, Randomized, Placebo-Controlled Study. *International Journal of Clinical Practice* 75(4), e13812.
- Sharifian-Nejad, M. S., & Shekarchizadeh, H. (2019). Physicochemical and Functional Properties of Oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) Polysaccharides Extracted Under Optimal Conditions. *International Journal of Biological Macromolecules* 124, 946–954.
- Si, C. L., Qin, P. P., Lu, Y. Y., et al. (2011). GC-MS Analysis of Chemical Composition and Free Radical Scavenging Activity of *Elaeagnus angustifolia* Bark. *Advanced Materials Research* 183, 854–858.
- Tehranizadeh, Z. A., Baratian, A., & Hosseinzadeh, H. (2016). Russian Olive (*Elaeagnus angustifolia*) as a Herbal Healer. *BioImpacts: BI* 6(3), 155.
- Torbati, M., Asnaashari, S., & F. Heshmati Afshar (2016). Essential Oil From Flowers and Leaves of *Elaeagnus angustifolia* (*Elaeagnaceae*): Composition, Radical Scavenging and General Toxicity Activities. *Advanced Pharmaceutical Bulletin* 6(2), 163–169.
- Wang, Y. A., Guo, T., C.-M. Zhao, J.-Y. Li, Zhao, P., & M.-T. Fan (2014). Changes in Total Phenolic and Flavonoid Contents and Antioxidant Activities of the Fruit From *Elaeagnus angustifolia* During an 80-Day Study Period. *Agro Food Industry Hi-Tech* 25, 7–10.
- Ya, W., Shang-Zhen, Z., Chun-Meng, Z., Tao, G., Jian-Ping, M., Ping, Z., & Qiuxiu, R. (2014). Research article antioxidant and Antitumor effect of different fractions

of ethyl acetate part from *Elaeagnus angustifolia* L. *Adv J Food Sci Technol* 6(5), 707–710.

Yalcin, G., & Sogut, O. (2014). Influence of Extraction Solvent on Antioxidant Capacity Value of Oleaster Measured by ORAC Method. *Natural Product Research* 28(18), 1513–1517.

Yuca, H., Ozbek, H., Demirezer, L. O., Kasil, H. G., & Guvenalp, Z. (2021). Trans-Tiliroside: A Potent Alpha-Glucosidase Inhibitor From the Leaves of *Elaeagnus angustifolia* L. *Phytochemistry* 188, 112795.

Zakaria, Z. Z., Ahen, Y., Ahmed, N. H., Sokary, S., Bawadi, H., & Al-Asmakh, M (2023). Exploring *Elaeagnus Angustifolia*: A Comprehensive Review of its Potential in Cancer Treatment and Management.

Zhang, W., Guo, Y., Cheng, Y., Yao, W., & Qian, H. (2023). Neuroprotective Effects of Polysaccharide From *Sparassis Crispa* on Alzheimer's Disease-Like Mice: Involvement of Microbiota-Gut-Brain Axis. *International Journal of Biological Macromolecules* 225, 974–986.



BEŞİNCİ TAT UMAMI: BİLİMSEL TEMELLER, KİMYASAL BİLEŞENLER VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

“ ”

Serpil YALIM KAYA¹

Eyyüp ALTUN²

1 Sorumlu Yazar: Dr. Öğretim Üyesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Turizm Fakültesi, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye.E-posta: syalim@mersin.edu.tr ORCID: 0000-0002-4762-596X

2 Yüksek Lisans Öğrencisi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Anabilim Dalı, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye.E-posta: 25053440006@mersin.edu.tr ORCID: 0009-0001-1263-7899

Bu bölüm, umami tadının teorik altyapısını, kimyasal bileşenlerini, reseptör mekanizmalarını, duyuşsal özelliklerini, doğal gıda kaynaklarını ve analiz yöntemlerini kapsar.

1. Giriş

Tat algısının ve özellikle umami tadının gıda endüstrisi ve gastronomi alanındaki önemi, sadece duyuşsal kabul ve lezzet zenginliğiyle sınırlı kalmayıp, ekonomik açıdan da sürdürülebilir ürün geliştirme stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Umami bileşenlerinin kullanımı, tüketici beklentilerini karşılamının yanı sıra, maliyet etkinliği ve sağlık politikaları doğrultusunda sodyum azaltımı gibi kritik hedeflere ulaşmada stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir. Doğal umami kaynaklarının ve süreç temelli umami oluşturma tekniklerinin ekonomik kullanımı, hem üretim maliyetlerinin optimize edilmesini hem de ürünlerin pazarlama değerinin artırılmasını sağlar. Ayrıca, umami temelli düşük sodyumlu ürünlerin geliştirilmesi, artan sağlık bilinci ve düzenleyici gereklilikler doğrultusunda pazar payı kazanma potansiyelini güçlendirmektedir. Bu nedenle, umaminin ekonomik boyutları; hammaddelerin seçimi, üretim süreçlerinin planlanması, ürün kalitesi ve tüketici kabulü arasındaki dengeyi kuran bütüncül yaklaşımlarla ele alınmalıdır. Bu bölümde, umami kavramı tarihsel gelişimi, kimyasal temeli ve algı mekanizmalarıyla birlikte bilimsel bir çerçevede ele alınmaktadır. Umaminin beşinci temel tat olarak kabul edilmesine ilişkin dayanaklar açıklanmakta; L-glutamat, 5'-ribonükleotitler ve peptitler gibi temel bileşenler ile umami tat reseptörleri ve fizyolojik süreçler değerlendirilmektedir. Ayrıca bitkisel ve hayvansal umami kaynakları tanıtılmakta ve umami bileşiklerinin belirlenmesinde kullanılan duyuşsal ve enstrümantal analiz yöntemleri (HPLC, EUC, elektronik dil, NIR vb.) özetlenmektedir. Bu doğrultuda bölüm, umami tadının oluşumu, algılanması ve ölçülmesine ilişkin bütüncül bir kuramsal çerçeve sunmaktadır.

2. Umami Kavramının Ortaya Çıkışı ve Tarihsel Gelişimi

Umami kavramının ortaya çıkışı, tat algısına dair klasik dört tat anlayışının sorgulanmasıyla başlamıştır. 20. yüzyılın başlarına kadar tat algısı, tatlı, tuzlu, ekşi ve acı olmak üzere dört temel tatla açıklanmış ve bu çerçeve Batı bilim dünyasında uzun süre sorgulanmadan kabul edilmiştir. Ancak bazı gıdalarda algılanan ve bu dört tatla açıklanamayan “lezzetli” ve “doyurucu” tat niteliği, yeni bir tat kategorisinin varlığına işaret etmiştir. Umami kavramı ilk kez 1908 yılında Japon kimyager Kikunae Ikeda tarafından bilimsel olarak tanımlanmıştır. Ikeda, kombu yosunu ve katsuobushi kullanılarak hazırlanan geleneksel Japon çorbası dashi'nin, tatlı, tuzlu, ekşi ve acı tatların hiçbirisiyle tam olarak açıklanamayan özgün bir tada sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bu gözlemden yola çıkarak söz konusu tadın kaynağını araştırmış ve yaptığı kimyasal analizler sonucunda bu lezzetin temel sorumlusunun L-glutamik

asit olduğunu ortaya koymuştur (Ikeda, 1908). Ikeda, glutamik asidin sodyum tuzunun (monosodyum glutamat, MSG) suda çözülmesinde aynı tat karakterini verdiğini göstermiş ve bu yeni tat duyusunu “umami” olarak adlandırmıştır. Böylece umami, ilk kez kimyasal bir bileşen ile duyuşsal algı arasında doğrudan ilişki kurularak tanımlanan bir tat olarak literatüre girmiştir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000). Ikeda’nın çalışmasını izleyen yıllarda, umami algısının yalnızca glutamatla sınırlı olmadığı anlaşılmıştır. Kodama (1913), katsuobushi’de bulunan inozin 5’-monofosfat (IMP)’ın da umami özellik taşıdığını bildirmiştir. Daha sonra Kuninaka (1960, 1964), maya RNA’sının biyokimyasal parçalanması sırasında ortaya çıkan guanozin 5’-monofosfat (GMP)’ın güçlü bir umami bileşiğı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmaların en önemli çıktılarından biri, glutamat ile 5’-ribonükleotitler arasındaki sinerjik etkileşimin keşfedilmesidir. Glutamat ile IMP veya GMP birlikte bulunduğunda, umami algısının tek başına glutamata kıyasla katlanarak arttığı gösterilmiştir. Bu sinerji, umami algısının kimyasal temellerinin anlaşılmasında dönüm noktası oluşturmuş ve daha sonra geliştirilen EUC yaklaşımının da temelini oluşturmuştur (Yamaguchi, 1998; Yamaguchi & Ninomiya, 2000). Başlangıçta umami, daha çok Doğu Asya mutfaklarıyla ilişkilendirilen kültürel bir kavram olarak algılanmış; Batı bilim dünyasında uzun süre temkinli yaklaşılmıştır. Ancak 2000’li yıllardan itibaren yapılan moleküler biyoloji ve nörofizyolojik çalışmalar, bu algıyı kökten değiştirmiştir. İnsan dilinde T1R1–T1R3 heterodimer reseptörlerinin ve mGluR1/mGluR4 reseptörlerinin glutamat ve nükleotitlere özgül yanıt verdiğinin gösterilmesi, umaminin diğer tatlardan bağımsız fizyolojik mekanizmalara sahip olduğunu ortaya koymuştur (Nelson et al., 2002; Zhang et al., 2003; Chaudhari & Roper, 2010). Bu bulgular, umaminin yalnızca kültürel veya gastronomik bir kavram olmadığını; biyolojik temellere dayanan bağımsız bir tat modalitesi olduğunu kesin biçimde ortaya koymuş ve umaminin beşinci temel tat olarak bilimsel kabulünü sağlamıştır. Bu nedenle MSG, doğal umami kaynaklarının modellenmesinde analitik bir referans bileşik olarak değerlendirilmektedir

3. Umaminin Kimyasal Temeli ve Tat Bileşikleri

Umami tadı, dil üzerindeki özgül tat reseptörlerinin belirli kimyasal bileşikler tarafından uyarılması sonucu ortaya çıkan özgül bir duyuşsal algıdır. Bu algının temelinde, başta L-glutamik asit olmak üzere bazı serbest amino asitler, 5’-ribonükleotitler ve belirli kısa zincirli peptitlerin birlikte ve etkileşimli biçimde rol aldığı çok bileşenli bir kimyasal sistem yer almaktadır. Umami, bu yönüyle tek bir molekülün doğrudan oluşturduğu basit bir tat algısından ziyade, farklı bileşiklerin birbirini güçlendirdiği sinerjik bir mekanizmanın sonucudur (Yamaguchi, 1998; Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2009).

Gıdalarda umami algısının şiddeti; umamiye katkı sağlayan bileşiklerin türüne, derişimine, birbirlerine oranına ve gıda matriksi içindeki biyoyararlanımlarına bağılı olarak önemli ölçüde değışkenlik göstermektedir. Aynı miktarda glutamat içeren iki farklı gıdanın umami algısının farklı olması, bu bileşiklerin matriksi içindeki dağılımı, eşlik eden nükleotitlerin varlığı ve işleme koşullarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle umami algısı, yalnızca kimyasal içerik üzerinden değıl, aynı zamanda gıdanın yapısal ve teknolojik özellikleri bağlamında değıerlendirilmelidir.

Umami tadının temel bileşeni L-glutamattır. Glutamik asit, proteinlerin yapısında yaygın olarak bulunan bir amino asit olup, gıdalarda hem proteinlere bağılı formda hem de serbest formda yer almaktadır. Ancak umami algısının oluşabilmesi için glutamatın serbest formda bulunması zorunludur; protein yapısına bağılı glutamat, tat reseptörlerini doğrudan aktive edememektedir (Ikeda, 1908; Fuke & Ueda, 1996). Bu nedenle serbest glutamat düzeyi, bir gıdanın umami potansiyelinin belirlenmesinde kritik bir göstergedir.

Serbest L-glutamat miktarı, gıdanın biyolojik kökenine ve uygulanan işleme bağılı olarak önemli ölçüde değışmektedir. Olgunlaşma, fermentasyon, kurutma ve uzun süreli pişirme gibi işlemler sırasında proteinlerin enzimatik veya termal hidrolizi gerçekleşmekte; bu süreçler proteinlere bağılı glutamatın serbestleşmesini sağlayarak umami algısını güçlendirmektedir. Bu biyokimyasal mekanizma, olgun peynirler, fermente et ürünleri, soya sosu, balık sosu ve domates gibi gıdalarda umaminin neden daha yoğun algılandığını açıklamaktadır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2009).

Glutamat, ortamın pH'ı ve iyonik kompozisyonuna bağılı olarak farklı iyonik formlarda bulunabilmektedir. Umami algısı açısından en etkili form, fizyolojik pH koşullarında baskın olan L-glutamat anyonudur. Monosodyum glutamat (MSG), L-glutamik asidin sodyum tuzu olup suda çözündüğünde serbest L-glutamat açığa çıkararak umami reseptörlerini etkin biçimde uyarır. Bu özellikleri nedeniyle MSG, duysal ve fizyolojik umami araştırmalarında standart referans bileşik olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır (Giacometti, 1979; Kurihara, 2009).

Bazı çalışmalarda, L-aspartat gibi diğerkarboksilik amino asitlerin de umamiye benzer ancak daha zayıf bir tat algısı oluşturabildiğı bildirilmiştir. Bununla birlikte, duysal açıdan tipik ve karakteristik umami algısının ana belirleyicisinin L-glutamat olduğı konusunda literatürde geniş bir görüş birliğı bulunmaktadır (Kawai et al., 2009; Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Hossain et al., 2024).

Umami algısının güçlenmesinde ikinci temel bileşik grubu 5'-ribonükleotitlerdir. Özellikle inosin 5'-monofosfat (IMP), guanozin 5'-monofosfat (GMP) ve adenozin 5'-monofosfat (AMP), umami algısında

belirleyici rol oynamaktadır. Bu nükleotitler tek başlarına zayıf bir umami algısı oluştursalar da, L-glutamat ile birlikte bulunduklarında güçlü bir sinerjik etki sergilemektedir (Kodama, 1913; Kuninaka, 1960, 1964; Yamaguchi, 1998). Bu sinerji, glutamatın umami reseptörlerine bağlanma afinitesinin nükleotitler tarafından artırılmasıyla açıklanmaktadır.

Glutamat-nükleotit sinerjisi sayesinde, duyuşal eşik değerlerinin oldukça altında bulunan derişimlerde bile yoğun bir umami algısı oluşabilmektedir. Bu durum, düşük düzeyde glutamat içeren bazı gıdaların neden güçlü umami özellikleri sergileyebildiğini açıklayan temel mekanizmadır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000). IMP genellikle et ve balık dokularında yüksek düzeyde bulunurken, GMP özellikle mantarlarda ve bazı bitkisel kaynaklarda yaygındır. AMP ise umami algısına daha sınırlı katkı sağlamakla birlikte, bazı gıdalarda destekleyici bir rol üstlenmektedir. Bu bileşiklerin dağılımı, gıdanın biyolojik kökeni ve işleme koşullarıyla yakından ilişkilidir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, umami algısının yalnızca serbest amino asitler ve nükleotitlerle sınırlı olmadığını; bazı kısa zincirli peptitlerin de umami tadına doğrudan veya dolaylı katkı sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Özellikle glutamat içeren dipeptitler ve oligopeptitler, umami reseptörlerini aktive edebilmekte veya glutamat-nükleotit sinerjisini güçlendirebilmektedir (Kawai et al., 2002; Shim et al., 2015; Cai et al., 2024). Bu peptitler çoğunlukla fermentasyon, olgunlaşma ve enzimatik hidroliz süreçleri sırasında proteinlerin parçalanması sonucu oluşmaktadır.

Fermente ürünlerde tanımlanan umami peptitlerinin çeşitliliği, umami algısının yalnızca tekil moleküllere değil, çok bileşenli ve etkileşimli bir kimyasal matrikse dayandığını göstermektedir (Zhao et al., 2016; Mao et al., 2023). Buna ek olarak, özellikle kabuklu deniz ürünlerinde bulunan süksinik asit ve türevlerinin de umamiyle ilişkili “etimsi” ve “broth-benzeri” tat notalarına katkı sağladığı bildirilmektedir. Ancak bu bileşikler genellikle tek başına klasik anlamda umami tadı oluşturmaz; glutamat ve nükleotitlerle birlikte algıyı zenginleştirici bir rol üstlenir (Yamaguchi, 1998).

3.1. Umami Bileşenlerinin Kimyasal Etkileşimleri ve Matriks Bağlılığı

Umami tadının kimyasal temeli, yalnızca bireysel bileşiklerin varlığıyla değil, bu bileşiklerin gıda matriksi içerisindeki etkileşimleri ve biyoyararlanımları ile belirlenmektedir. Bu bağlamda umami, klasik anlamda tek bir “tat maddesi”ne indirgenemeyen; çok bileşenli, dinamik ve bağlama duyarlı bir kimyasal sistem olarak değerlendirilmektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2009).

Güncel literatür, serbest L-glutamatın umami algısı için gerekli ancak tek başına yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Aynı serbest glutamat

derişimine sahip farklı gıdaların umami yoğunluğunun değişkenlik göstermesi, bu bileşimin 5'-ribonükleotitler, peptitler ve organik asitlerle olan etkileşimine bağlıdır. Özellikle IMP ve GMP'nin varlığı, glutamatın tat reseptörlerine bağlanma etkinliğini artırarak algısal şiddeti belirgin biçimde yükseltmektedir (Yamaguchi, 1998; Kurihara, 2015).

Bu sinerjik etki, yalnızca duysal gözlemlerle değil, kimyasal ve fizyolojik verilerle de desteklenmektedir. Glutamat-nükleotit sinerjisi, düşük derişimlerde dahi yüksek umami algısının oluşmasını mümkün kılmakta; bu durum umaminin doğrusal olmayan bir tat algısı sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle umami yoğunluğu, tek tek bileşiklerin toplamı olarak değil, etkileşimli bir kimyasal ağı sonucunda ele alınmalıdır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000).

Umami bileşenlerinin matriks bağımlılığı, özellikle protein yapısı, su aktivitesi, pH ve iyonik ortam gibi faktörlerle yakından ilişkilidir. Gıdalarda proteinlerin enzimatik veya termal hidrolizi sırasında ortaya çıkan serbest glutamat ve kısa zincirli peptitler, umami algısının temelini oluşturmaktadır. Bu mekanizma, fermente ürünlerde ve uzun süre olgunlaştırılmış gıdalarda umaminin neden daha yoğun hissedildiğini açıklamaktadır (Kurihara, 2009).

Son yıllarda tanımlanan umami peptitleri, bu bağlamda klasik amino asit merkezli umami modelinin genişletilmesini zorunlu kılmıştır. Glutamat içeren dipeptit ve oligopeptitlerin, umami reseptörlerini doğrudan aktive edebildiği ya da glutamat-nükleotit sinerjisini güçlendirdiği bildirilmektedir (Kawai et al., 2002; Shim et al., 2015; Cai et al., 2024). Bu peptitlerin çoğunlukla fermentasyon ve olgunlaşma süreçlerinde ortaya çıkması, umaminin zaman ve süreç bağımlı bir tat olduğunu göstermektedir.

Fermente ürünlerde tanımlanan umami peptitlerinin çeşitliliği, umami algısının statik değil; mikrobiyal aktivite, enzimatik hidroliz ve kimyasal dönüşümlerle sürekli yeniden şekillenen bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır (Zhao et al., 2016; Mao et al., 2023). Bu durum, umami tadının yalnızca bileşen temelli değil, süreç temelli bir kimyasal fenomen olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bunun yanı sıra, süksinik asit ve bazı organik asitlerin, özellikle deniz ürünlerinde umamiyle ilişkili "broth-benzeri" ve "etimsi" tat notalarına katkı sağladığı bildirilmektedir. Ancak bu bileşikler, klasik anlamda tek başına umami oluşturmaz; glutamat ve nükleotitlerle birlikte algısal bütünlüğü artıran destekleyici unsurlar olarak işlev görür (Yamaguchi, 1998). Bu bulgular ışığında umami tadı, serbest amino asitler, 5'-ribonükleotitler, umami peptitleri ve yardımcı organik bileşiklerin birlikte oluşturduğu çok katmanlı bir kimyasal sistem olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla umami algısının değerlendirilmesi, yalnızca tek bir bileşimin nicel tayinine indirgenemeyecek kadar karmaşık bir yapı sergilemektedir.

3.2. Umaminin Duyusal Profili ve Tat Etkileşimleri

Umami tadı, yalnızca belirli bir lezzet hissinin algılanmasından ibaret olmayıp, ağız içi fizyoloji ve nörosensoryal mekanizmalar üzerinden lezzet deneyiminin bütüncül biçimde şekillenmesinde rol oynayan çok boyutlu bir duyusal özelliktir. Umami bileşenlerinin ağızda algılanması, tat reseptörlerinin uyarılmasının yanı sıra tükürük salgısının artışıyla da ilişkilidir. Artan tükürük üretimi, tat bileşenlerinin ağız içinde daha homojen dağılmasını sağlayarak ağız dolgunluğu hissini güçlendirmekte ve tat algısının daha uzun süre devam etmesine katkı sunmaktadır (Kurihara, 2009; Kurihara, 2015). Umami algısının ayırt edici özelliklerinden biri, tat kalıcılığının diğer temel tatlara kıyasla daha uzun sürmesidir. Bu uzun süreli algı, umamiye özgü reseptör sistemlerinin oluşturduğu sinyal sürekliliğiyle ilişkilendirilmektedir. Yamaguchi ve Ninomiya (2000), umaminin bu “uzayan tat” karakterinin, lezzet deneyiminde derinlik ve doygunluk hissini artırdığını ve bu yönüyle umaminin yalnızca bağımsız bir tat değil, lezzet bütünlüğünü düzenleyen bir unsur olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Umami tadı, diğer tat modaliteleriyle olan etkileşimleri sayesinde lezzet entegrasyonunu destekleyen bir işlev de üstlenmektedir. Özellikle tuzluluk algısını güçlendirme etkisi, umaminin fizyolojik düzeyde tat sinyallerini modüle edebilme kapasitesiyle açıklanmaktadır. Glutamat ve nükleotitlerin birlikte algılanması, tuzluluk sinyallerinin daha belirgin hissedilmesini sağlamakta; bu durum düşük sodyumlu ürünlerde dahi yeterli lezzet yoğunluğunun korunmasına olanak tanımaktadır (Yamaguchi & Takahashi, 1984; Beauchamp, 2009). Buna ek olarak umami, acı ve istenmeyen tat bileşenlerinin algısını baskılayarak tat kusurlarının dengelenmesine katkı sağlamaktadır. Bu maskeleyme etkisi, hem periferik tat reseptör düzeyinde hem de merkezi sinir sisteminde tat sinyallerinin entegrasyonu sırasında ortaya çıkan nörofizyolojik süreçlerle ilişkilendirilmektedir. Kurihara (2015), umaminin acılık ve aşırı ekşilik gibi sert tatların algısal keskinliğini azaltarak, lezzet profilini daha yuvarlak ve kabul edilebilir hâle getirdiğini belirtmektedir.

Umami tadının duyusal profili, çoğu zaman doğrudan algılanan baskın bir tat olmaktan ziyade, diğer tat modalitelerinin algısını düzenleyen modülatör bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Aromatik bileşenlerin algısal bütünlüğünün artırılması, ağız dolgunluğu hissinin güçlendirilmesi ve tatlar arası geçişlerin yumuşatılması, umaminin en belirgin duyusal etkileri arasında yer almaktadır (Beauchamp, 2009). Bu özellikler, umaminin gastronomik uygulamalarda neden sıklıkla “lezzet derinleştirici” olarak tanımlandığını açıklamaktadır. Umami, duyusal açıdan yalnızca bir tat değil; lezzet mimarisini şekillendiren, tat bileşenleri arasındaki etkileşimi düzenleyen ve algısal sürekliliği sağlayan merkezi bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015).

3.3. Kimyasal Umami Bileşenlerinden Fizyolojik Algıya Geçiş

Yukarıda ele alınan bulgular, umami tadının kimyasal bileşiminin ve gıda matriksi içindeki etkileşimlerinin duyuşsal algının oluşumunda belirleyici olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte umami algısı, yalnızca gıdada bulunan bileşiklerin nicel ve nitel özellikleriyle sınırlı olmayıp, serbest amino asitler, 5'-ribonükleotitler ve umami peptitleri tarafından oluşturulan bu çok bileşenli yapının tat reseptörleri ve bunlara bağlı fizyolojik sinyal yolları aracılığıyla algısal bir deneyime dönüştürülmesiyle ortaya çıkmaktadır. Özellikle glutamat ve 5'-ribonükleotitler arasındaki sinerjik etkileşimin, reseptör bağlanma afinitesi ve sinyal şiddeti üzerinden fizyolojik karşılık bulması, umami algısının çok katmanlı doğasını açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu nedenle umami tadının bütüncül olarak anlaşılabilmesi, kimyasal bileşenlerin tanımlanmasının ötesinde, bu bileşenlerin hangi reseptör sistemleri tarafından algılandığı ve hangi hücrel sinyal yollarını aktive ettiği sorularının yanıtlanmasını gerektirmektedir. Bu çerçevede bir sonraki bölümde, umami algısında görev alan T1R1/T1R3 heterodimeri, metabotropik glutamat reseptörleri ve bu reseptörlerin aracılık ettiği hücre içi sinyal entegrasyonu mekanizmaları ele alınacaktır.

4. Umami Tat Reseptörleri ve Fizyolojik Mekanizmalar

Umami tadı, yalnızca kimyasal bileşenlerin varlığıyla değil, bu bileşenlerin biyolojik sistemler tarafından nasıl algılandığı ve işlendiğiyle anlam kazanan çok katmanlı bir duyuşsal olgudur. Bu nedenle umaminin anlaşılması, tat algısının hücrel düzeyden merkezi sinir sistemine, duyuşsal deneyimden fizyolojik yanıtlara uzanan bütüncül bir perspektifle ele alınmasını gerektirmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde, umami algısının reseptör temelli mekanizmaları, sinirsel işleme süreçleri ve sindirimle ilişkili fizyolojik etkileri, güncel bilimsel bulgular ışığında sistematik olarak incelenmektedir.

4.1. Umami Algısında Çoklu Reseptör Katılımı ve Sinyal Entegrasyonu

Umami tadının algılanması, dilde bulunan özelleşmiş tat tomurcuklarındaki özgül kimyasal reseptörlerin uyarılmasıyla gerçekleşir. Uzun süre umaminin tatlı veya tuzlu tat yollarının bir varyasyonu olup olmadığı tartışılrsa da, moleküler biyoloji, hücrel fizyoloji ve elektrofizyoloji alanlarındaki çalışmalar, umaminin diğer temel tatlardan bağımsız, kendine özgü reseptör sistemlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur (Zhang et al., 2003; Chaudhari & Roper, 2010).

Tat tomurcuklarında bulunan Tip II tat hücreleri, umami algısından sorumlu başlıca hücre grubudur. Bu hücreler, G-proteinine bağlı reseptörler aracılığıyla glutamat ve umamiyle ilişkili diğer bileşiklere yanıt verir; oluşan sinyalleri hücre içi sinyal iletim mekanizmalarıyla merkezi sinir

sistemine aktarır. Bu süreç, umami algısının basit iyon kanallarına dayalı bir mekanizma değil, metabotropik reseptörler üzerinden işleyen karmaşık bir fizyolojik süreç olduğunu gösterir.

Umami algısının temel reseptör sistemi, T1R1 ve T1R3 alt birimlerinden oluşan heterodimer yapıdır. Bu reseptör kompleksi, G-proteinine bağlı reseptörler (GPCR) ailesine aittir ve özellikle L-glutamat ile 5'-ribonükleotitler (inosin monofosfat – IMP ve guanozin monofosfat – GMP) karşı yüksek özgüllük gösterir (Nelson et al., 2002; Zhang et al., 2003). L-glutamat, reseptörün ligand bağlanma bölgesine bağlanırken, IMP veya GMP gibi nükleotitlerin eşzamanlı bağlanması, glutamata olan bağlanma afinitesini artırarak hücre içi sinyal iletimini güçlendirir. Bu moleküler etkileşim, gıdalardaki glutamat-nükleotit sinerjisinin fizyolojik temelini oluşturur (Li et al., 2002; Zhang et al., 2003).

Reseptör aktivasyonu sonrasında, G-proteini aracılığıyla fosfolipaz C β 2 (PLC β 2) yolu aktive edilir; inositol trifosfat (IP $_3$) üretimi ve hücre içi kalsiyum düzeyinde artış gerçekleşir. Yükselen kalsiyum seviyesi, iyon kanallarının açılmasına ve tat hücresinin depolarizasyonuna yol açarak sinirsel iletimi sağlar (Chaudhari & Roper, 2010). T1R1/T1R3 sistemine ek olarak, tat tomurcuklarında eksprese edilen metabotropik glutamat reseptörleri (mGluR1 ve mGluR4) de umami algısına katkı sağlar. Bu reseptörlerin etkisi daha sınırlı olmakla birlikte, özellikle düşük glutamat derişimlerinde algısal eşiklerin düşürülmesinde rol oynar (San Gabriel et al., 2009; Nakashima et al., 2012). Bu durum, umami algısının tek bir reseptöre değil, çoklu ve tamamlayıcı reseptör sistemlerine dayandığını gösterir (Roper, 2013).

4.2. Umami Algısının Merkezi Sinir Sistemi İşlenmesi

Umami algısı, periferik reseptörlerden başlayan sinyallerin merkezi sinir sistemi (MSS) tarafından işlenmesiyle bütüncül bir duyuusal deneyime dönüşür. Tat tomurcuklarından gelen sinyaller, kranial sinirler aracılığıyla beyin sapına iletilir ve üst merkezlerde algısal değerlendirmeye tabi tutulur (Chaudhari & Roper, 2010; Roper, 2013). Umami uyaranlarının MSS'de oluşturduğu sinirsel yanıtlar, diğer temel tatlara kıyasla daha yavaş başlar ancak daha uzun sürer. Bu zamansal özellik, umaminin kalıcılık, ağız dolgunluğu ve tatların bütünleşmesi gibi duyuusal nitelikleriyle doğrudan ilişkilidir (Beauchamp, 2009). Ayrıca, metabotropik reseptörler aracılığıyla iletilen sinyallerin zamana yayılması, algısal sürekliliğin fizyolojik temelini oluşturur.

Merkezi sinir sistemi düzeyinde umami, diğer tat modaliteleriyle güçlü etkileşimler gösterir. Umami uyaranları, tuzluluk ve tatlılık algısıyla ilişkili sinirsel yanıtları güçlendirirken, acılık ve aşırı ekşilikle ilişkili yanıtları dengeler (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Beauchamp, 2009). Bu etkileşim, umaminin lezzet deneyimini yapılandırıcı bir unsur olmasını sağlar. Bireyler

arası farklılıklar ise tat deneyimi, beslenme alışkanlıkları ve fizyolojik durum gibi faktörlerin MSS'deki sinyal entegrasyonunu etkilemesiyle açıklanır (Roper, 2013).

4.3. Umami Algısının Sindirim ve Metabolik Yanıtlarla İlişkisi

Umami reseptörlerinin uyarılması, sadece tat algısının oluşmasıyla kalmaz; aynı zamanda sindirim sistemine yönelik hazırlayıcı fizyolojik yanıtları da tetikler. Umami uyaranları tükürük salgısını artırır ve ağız içi sıvı dağılımını destekler, böylece tat bileşenlerinin reseptörlerle temas süresini uzatır (Beauchamp, 2009). Artan tükürük üretimi, umami algısının ağızda daha yayılcı ve kalıcı olmasına katkı sağlar; bu da umaminin “yuvarlak” ve “tatmin edici” bir tat olarak tanımlanmasını destekler. Umaminin diğer tatlara kıyasla daha uzun süreli sinirsel aktivitesi de bu fizyolojik yanıtlarla uyumludur (Chaudhari & Roper, 2010; Roper, 2013).

Sindirim sistemi boyunca glutamata duyarlı reseptörlerin varlığı, umami algısının ağızla sınırlı olmadığını; gastrointestinal sistemde de fizyolojik karşılıkları olduğunu gösterir. Bu durum, umaminin besin alımına yönelik hazırlayıcı ve düzenleyici bir sinyal olarak işlev gördüğünü düşündürür (Kurihara, 2009). Böylece umami, duyuusal deneyim, sindirim fizyolojisi ve metabolik yanıtlar arasında bağlantı kuran bütünlük bir biyolojik sinyal olarak değerlendirilir. Bu özellik, umaminin gastronomi ve gıda formülasyonu alanlarında stratejik bir lezzet bileşeni olarak önemini açıklar.

Duyuusal açıdan umami, yumuşak, dengeli ve bütünlük bir tat profili sunar. Tatların birleşmesini sağlar ve gıdanın genel lezzet yoğunluğunu artırır. Umami algısı, diğer tatlara kıyasla daha yavaş başlar ancak daha uzun sürer; bu da ağızda kalıcılık, dolgunluk ve doyum hissi yaratır (Beauchamp, 2009). Umami, tuzluluk algısını güçlendirir, böylece daha düşük sodyum içeren ürünlerde bile yeterli tuzluluk hissi korunur. Ayrıca aşırı tatlılık hissini dengeler, acı bileşenlerin keskinliğini maskeleyerek sert acılığın kabul edilebilir olmasını sağlar ve yüksek asitli gıdalarda ekşilik algısını dengeleyerek aromatik bütünlüğü artırır (Beauchamp, 2009). Tüm bu özellikler, umaminin gastronomide ve gıda formülasyonlarında güçlü bir “lezzet artırıcı” unsur olarak kullanılmasını sağlar.

Umami algısının bireyler arası farklılıkları, tat tomurcuklarındaki T1R1/T1R3 reseptör kompleksinin ekspresyon düzeyi ve hücre içi sinyal iletim verimliliği gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca yaş, fizyolojik durum, tat deneyimi ve beslenme alışkanlıkları da algının şiddetini etkiler. Bu nedenle umami algısı, sabit bir duyuusal deneyim olmayıp bireysel değişkenlikler gösterir (Beauchamp, 2009; Roper, 2013).

Umami, tek başına baskın bir tat olmaktan çok, gıdanın genel tat profilini dengeleyen ve diğer tat bileşenlerinin algısal bütünlüğünü artıran

bir rol üstlenir. Tatlar arası etkileşimi düzenleyerek algısal sürekliliği artırır ve lezzet deneyimini yapılandırır. Bu yönleriyle umami, temel tatlardan biri olmasının ötesinde, duyuşsal ve fizyolojik açıdan karmaşık ve bütünleşik bir tat unsurudur.

Umami algısının moleküler, sinirsel ve fizyolojik mekanizmalarının anlaşılması, gastronomi, gıda bilimi ve beslenme alanlarında hem lezzet geliştirme hem de sağlık açısından önemli uygulamalara temel oluşturur.

5. Umaminin Gıdalardaki Doğal Kaynakları (Bitkisel ve Hayvansal)

Umami tadı, temel olarak üç ana bileşiğin varlığına dayanmaktadır: serbest L-glutamat, inosin 5'-monofosfat (IMP) ve guanozin 5'-monofosfat (GMP). Bu bileşiklerin gıdalardaki dağılımı; biyolojik köken, hücresel yapı ve uygulanan işleme süreçlerine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Genel olarak serbest L-glutamat bitkisel kaynaklarda baskınken, IMP ve GMP ağırlıklı olarak hayvansal dokular ile bazı mantar türlerinde bulunmaktadır. Bu biyokimyasal dağılım, umami algısının gıdalar arasında neden değişkenlik gösterdiğini açıklamaktadır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015).

Bitkisel kaynaklar arasında domates, doğal umami açısından en önemli gıdalardan biri olarak öne çıkmaktadır. Olgunlaşma sürecinde ve özellikle ısıtma işlemi ile kurutma uygulamalarında domateste serbest glutamat miktarının belirgin biçimde arttığı; taze domateste yaklaşık 140–250 mg/100 g düzeylerinde bildirilen serbest glutamat içeriğinin, işlenmiş ürünlerde daha da yükseldiği belirtilmektedir (Bellisle, 1999; Yamaguchi & Ninomiya, 2000). Mantarlar, özellikle shiitake, hem serbest glutamat hem de GMP içermeleri nedeniyle bitkisel kaynaklar içinde özel bir konuma sahiptir. Kurutulmuş shiitake mantarında serbest glutamat düzeylerinin taze forma kıyasla belirgin biçimde arttığı ve bunun umami algısını güçlendirdiği bildirilmektedir (Beluhan & Ranogajec, 2011). Deniz yosunları, özellikle kombu, doğal glutamat içeriği en yüksek bilinen gıdalar arasında yer almakta; kombunun bonito balığıyla birlikte kullanıldığı dashi, glutamat-IMP sinerjisinin klasik bir örneğini oluşturmaktadır (Kurihara, 2015). Baklagiller ve turpgiller ise orta düzeyde serbest glutamat içeren bitkisel kaynaklar olup, ısıtma işlemi ve pişirme sırasında proteinlere bağlı glutamatın serbestleşmesiyle umami potansiyelleri artmaktadır (Tennant, 2018).

Hayvansal kaynaklarda umami algısının ana belirleyicisi IMP'dir. Kas dokusunda postmortem dönemde ATP'nin yıkımı sonucu oluşan IMP, özellikle pişirme sırasında et suyuna geçerek karakteristik umami tadını oluşturmaktadır. Tavuk etinde serbest glutamat ve IMP düzeylerinin, sığır ve domuz etine kıyasla daha yüksek olduğu; bu nedenle tavuk suyunun umami açısından belirgin bir yoğunluk sergilediği bildirilmektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000). Balık ve deniz ürünleri, özellikle bonito, ton balığı ve

kabuklu deniz ürünleri, hem serbest glutamat hem de IMP bakımından zengin olup, kurutma ve fermentasyon işlemleri bu bileşiklerin yoğunluğunu daha da artırmaktadır (Kurihara, 2015).

Süt ürünleri içinde uzun süre olgunlaştırılmış peynirler, özellikle Parmesan, en yüksek serbest glutamat içeriğine sahip gıdalar arasında yer almaktadır. Olgunlaşma sürecinde gerçekleşen proteoliz sonucunda serbest glutamat miktarının 1.000 mg/100 g'ın üzerine çıkabildiği; bu durumun umami algısını belirgin biçimde güçlendirdiği bildirilmektedir (Bellisle, 1999). Benzer şekilde fermente soslar (özellikle soya sosları ve baklagil bazlı fermente ürünler), yüksek serbest glutamat düzeyleri nedeniyle doğal umami kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Tennant, 2018).

Bitkisel ve hayvansal umami kaynakları birlikte değerlendirildiğinde, bitkisel gıdaların ağırlıklı olarak glutamat, hayvansal gıdaların ise IMP bakımından zengin olduğu; mantarlar, deniz yosunları ve fermente ürünlerin ise her iki bileşik grubunu bir arada içermeleri nedeniyle biyokimyasal açıdan ara ve tamamlayıcı bir konumda yer aldığı görülmektedir. Bu dağılım, umami algısının yalnızca gıdanın kökenine değil, bileşen kombinasyonlarına ve uygulanan teknolojik işlemlere bağlı olarak şekillendiğini ortaya koymaktadır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015; Tennant, 2018).

6. Umami Tadının Analiz Yöntemleri: Kimyasal, Duyusal ve Enstrümantal Yaklaşımlar

Umami tadının analizi ve ölçümü, tat algısının çok bileşenli ve bağlama duyarlı doğası nedeniyle farklı metodolojik düzeylerde ele alınmayı gerektirmektedir. Umamiye katkı sağlayan bileşiklerin gıda matriksi içerisindeki dağılımı, işleme koşullarıyla geçirdiği dönüşümler ve algısal karşılıkları, bu tadın değerlendirilmesinde tekil ölçüm yaklaşımlarının ötesine geçilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda umami araştırmaları, hem algısal değerlendirmeye dayalı yöntemleri hem de bu algının altında yatan bileşenleri tanımlamaya yönelik analitik teknikleri kapsayan çok katmanlı bir yapı sergilemektedir. Alan yazında uzun süredir kullanılan duyusal değerlendirmeler ve referans kimyasal analizler, umami bileşenlerinin tanımlanması ve karşılaştırılabilir biçimde ifade edilmesi açısından temel bir çerçeve sunmaktadır. Ancak gıda sistemlerinin karmaşıklığı ve matriks etkileri, bu yöntemlerin tek başına her zaman yeterli olmamasına yol açabilmektedir. Bu durum, umami bileşenlerinin hızlı, tahribatsız ve yüksek veri yoğunluğu ile incelenmesine olanak tanıyan yeni nesil enstrümantal yaklaşımların geliştirilmesini ve yaygınlaşmasını beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla umami tadının analizi, yerleşik değerlendirme yöntemleri ile gelişmiş sensör ve spektral tekniklerin birbirini tamamladığı bir metodolojik bütünlük içinde ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, umamiye ilişkin kimyasal

verilerin algısal sonuçlarla daha tutarlı biçimde ilişkilendirilmesini mümkün kılmakta ve farklı gıda sistemlerinde umami karakteristiğinin daha kapsamlı biçimde ortaya konmasına olanak sağlamaktadır.

Umami tadının değerlendirilmesinde hem duyuusal analiz yöntemleri hem de kimyasal/enstrümantal teknikler birlikte kullanılmaktadır. Umami algısı, serbest amino asitler (özellikle L-glutamat ve L-aspartat), 5'-nükleotitler (IMP, GMP), bazı peptitler ve organik asitlerin birleşik etkisine dayandığı için analizler çok yönlü yürütülmektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015; You et al., 2024). Bu nedenle umami araştırmalarında genellikle duyuusal analiz + HPLC ile serbest amino asit ve 5'-nükleotit tayini + Eşdeğer Umami Konsantrasyonu (EUC) hesabı + elektronik dil gibi sensör temelli yaklaşımlar bir arada kullanılmaktadır (Hwang, Ismail, & Joo, 2020; Ren et al., 2022; Cai et al., 2024).

6.1. Duyusal Analiz Yöntemleri

Umami analizinde en temel yaklaşım, eğitimli panelistler ile yapılan duyuusal değerlendirmelerdir. Eşik testi, hedonik testler, sıralama testleri ve tanımlayıcı analiz gibi yöntemlerle gıdaların umami yoğunluğu, tuzlulukla etkileşimi ve genel lezzet kabulü değerlendirilmektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Bellisle, 1999). Tanımlayıcı analizlerde panelistler, umami yoğunluğu, ağız dolgunluğu (mouthfulness), kalıcılık, tuzlulukla etkileşim ve genel lezzet dengesi gibi parametreleri nicel ölçekler üzerinden değerlendirmektedir.

Yamaguchi ve Ninomiya (2000), glutamat ile 5'-nükleotitler arasındaki sinerjiyi duyuusal panel deneyleriyle göstermiş ve belirli konsantrasyon aralıklarında umami yoğunluğunun katlanarak arttığını rapor etmiştir. Kawai ve arkadaşları (2002) da çeşitli amino asitler ile IMP kombinasyonlarını psikofiziksel yöntemlerle test etmiş, özellikle L-alanin, L-serin ve glisin ile IMP birleştğinde ortaya çıkan tadın panelistler tarafından umami olarak tanımlandığını bildirmiştir.

Duyuusal testlerin planlanması, panelist eğitimi, skala seçimi ve veri analizi için Stone ve Sidel'in *Sensory Evaluation Practices* (2004) kitabı, gıda duyuusal analizi alanında temel başvuru kaynağı olarak kabul edilmektedir (Stone & Sidel, 2004). Bununla birlikte duyuusal değerlendirmelerin doğası gereği subjektif olabilmesi nedeniyle, bu yöntemler çoğunlukla kimyasal analizler ve nesnel sensör verileri ile desteklenmektedir. Panelistlerin bireysel algı farklılıkları, eğitim düzeyi, yorgunluk durumu ve deneyim geçmişi, elde edilen sonuçlar üzerinde etkili olabilmektedir.

6.2. Serbest Amino Asit ve Nükleotit Analizi (HPLC)

Umami bileşenlerinin nicel olarak belirlenmesinde en yaygın kullanılan teknik Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC)'dir. Et, balık, mantar

ve çeşitli fermente ürünlerde serbest L-glutamat, L-aspartat ve 5'-nükleotitlerin (özellikle 5'-IMP ve 5'-GMP) tayini için ters faz HPLC sistemleri, çoğunlukla UV veya floresans dedektörleri ile birlikte kullanılmaktadır (You et al., 2024; Liu et al., 2019; Zhao, Schieber, & Gänzle, 2016).

Liu ve arkadaşları (2019), kabuklu deniz ürünlerinde umamiyle ilişkili serbest amino asitler ve 5'-nükleotitleri HPLC ile nicel olarak belirlemiş ve bu bileşenlerin toplam umami şiddetine katkısını değerlendirmiştir. You ve arkadaşları (2024) ise ette tat-aktif bileşenlere dair derlemelerinde, serbest amino asitler ve 5'-nükleotitlerin kantitatif tayininde HPLC'nin standart yöntem olduğunu vurgulamaktadır. Wu ve arkadaşları (2016), birada bulunan umami peptitlerinin tanımlanması ve analizini ele aldıkları çalışmalarında, fermentasyon sürecinde umami bileşenlerinin oluşumunu takip etmek için HPLC temelli analizlerin yaygın kullanıldığını belirtmektedir. Bu nedenle HPLC, kimyasal umami profilinin belirlenmesinde standart referans yöntemi olarak kabul edilir.

6.3. Eşdeğer Umami Konsantrasyonu (EUC) Hesaplaması

Umami şiddetini yalnızca kimyasal konsantrasyonlar üzerinden değil, duyuşal eşdeğer üzerinden ifade etmek amacıyla Eşdeğer Umami Konsantrasyonu (Equivalent Umami Concentration – EUC) modeli geliştirilmiştir. Bu model, Yamaguchi ve arkadaşlarının 1970'lerde glutamat ve 5'-nükleotitlerin göreceli tat yoğunluklarını ölçtüğü psikofiziksel deneylere dayanmaktadır (Yamaguchi et al., 1971). EUC hesabında, glutamat ve aspartat gibi umami amino asitlerinin konsantrasyonları ile IMP, GMP ve AMP gibi 5'-nükleotitlerin konsantrasyonları ve bunların bilinen sinerji katsayıları kullanılarak, örneğin bir gıdanın “g MSG/100 g eşdeğer umami şiddeti” hesaplanır (Hwang et al., 2020; Ren et al., 2022).

Sous-vide dana etinde umami tadının tanımlanmasına yönelik bir çalışmada Hwang ve arkadaşları (2020), kimyasal analizler ile EUC hesabını ve elektronik dil verilerini birleştirerek farklı pişirme sıcaklıklarının umami şiddeti üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Benzer şekilde Ren ve arkadaşları (2022), farklı kurutma yöntemleriyle hazırlanan mantarlarda EUC'yi kullanarak umami gücünü karşılaştırmış ve eşdeğer MSG miktarı cinsinden yorumlamıştır. EUC, özellikle balık roes, mantar, et suyu, balık suyu ve fermente ürünlerin umami potansiyellerinin karşılaştırılmasında pratik bir indeks olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Phetchthumrongchai et al., 2022; Wang et al., 2025).

6.4. Gaz Kromatografisi – Kütle Spektrometrisi (GC–MS)

GC–MS, umamiyle ilişkilendirilen uçucu aroma bileşiklerinin analizinde önemli bir tekniktir. Glutamat ve 5'-nükleotitler doğrudan GC–MS ile ölçülmesi de, bu bileşiklerin varlığı ve işlenme koşulları, Maillard

reaksiyonları ve lipid oksidasyonu yoluyla umami algısını güçlendiren “etimsi” ve “broth-benzeri” aromaların oluşumunu etkiler (You et al., 2024; Tamura et al., 2022).

Örneğin Xiao ve arkadaşları (2015), tavuk etine dayalı çorbada uçucu bileşenleri GC-MS ile karakterize etmiş ve heterosiklik kükürtlü bileşiklerin etimsi ve karamelize aromaya önemli katkı yaptığını göstermiştir. Bu çalışmalar, umami tadı doğrudan GC-MS ile ölçülme de, tat-aroma etkileşimi bağlamında umamiyle ilişkili aroma profilinin anlaşılmasında GC-MS'nin tamamlayıcı bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Umami bileşenleri doğrudan uçucu olmamakla birlikte, Maillard reaksiyonları ve lipid oksidasyonu gibi süreçler yoluyla oluşan aroma bileşenlerinin algısal etkisini güçlendirmektedir.

6.5. Elektronik Dil (E-Tongue) Sistemleri

Elektronik dil (e-tongue) sistemleri, farklı tat modalitelerine duyarlı sensör dizileri kullanarak numunelerin tat profilini nesnel ve tekrarlanabilir şekilde ölçmeyi amaçlayan enstrümantal yöntemlerdir. Toko (2000), lipid/polimer membranlı tat sensörlerinden oluşan bu sistemleri “elektronik dil” kavramı altında tanımlamış ve özellikle umamiye duyarlı sensörlerin geliştirilmesini ayrıntılı biçimde açıklamıştır.

Zhang ve arkadaşları (2023), soya sosunda umami tespitine yönelik çalışmalarında, elektronik dil ile umami sensör çıktılarını HPLC ile belirlenmiş amino asit ve 5'-nükleotit profilleriyle ilişkilendirerek rafine etme sürecinin tat üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Cai ve ark. (2024) ise yine soya sosu örneklerinde elektronik dil, amino asit analizörü ve MALDI-TOF MS'i birlikte kullanarak umami karakteristiğini tanımlamış ve peptit fraksiyonlarının umami algısına katkısını ortaya koymuştur.

Sous-vide dana etini inceleyen Hwang ve arkadaşları (2020), elektronik dil çıktıları ile EUC değerleri arasında anlamlı korelasyonlar bulmuş; böylece e-tongue sistemlerinin kimyasal umami göstergeleriyle birlikte kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca Iiyama ve arkadaşları (1998) gibi erken dönem çalışmalar, MSG, IMP ve GMP gibi umami bileşiklerinin tat sensörlerindeki yanıt desenlerini nicel olarak göstermiştir. Elektronik dil, özellikle soya sosu, çorba bazları, et suyu, mantar ve fermente ürünlerin sınıflandırılması, kalite farklarının belirlenmesi ve umami yoğunluğunun tahmini için güncel literatürde sık kullanılan bir araç hâline gelmiştir (Zhang et al., 2023; Cai et al., 2024; Hossain et al., 2024). Elektronik dil sistemlerinin umami değerlendirmesindeki en önemli avantajı, duyuşal panel verileriyle karşılaştırılabilir sonuçlar üretirken insan faktöründen kaynaklanan değişkenliği azaltmasıdır.

6.6. Yakın Kızılötesi Spektroskopisi (NIR) ve Spektral Teknikler

Yakın kızılötesi spektroskopisi (NIR), gıdalarda umamiyle ilişkili bileşenlerin hızlı ve tahribatsız tahmininde kullanılan önemli bir tekniktir. NIR doğrudan “tat” ölçmese de, serbest amino asitler, amino asit azotu, nem ve protein fraksiyonları gibi umamiyle ilişkili kimyasal parametreler için kalibrasyon modelleri oluşturulmasına olanak tanır (Ertugay & Başlar, 2011).

Bagnasco ve arkadaşları (2014), tilapia filetolarında voltametrik elektronik dil ile NIR spektroskopisini birleştirerek umami tadının hızlı değerlendirilmesini amaçlamış; NIR spektrumları ile umamiye katkı sağlayan amino asit ve nükleotid içeriği arasındaki ilişkileri çok değişkenli modellerle ortaya koymuştur. Çin soya sosu üzerinde yapılan çalışmalarda NIR spektroskopisinin, amino asit azotu içeriği ve duyu tat skorlarını hızlıca tahmin etmek için kullanılabildiği gösterilmiştir (Chen et al., 2023; Zhao et al., 2013). Sun ve arkadaşları (2023) ise somonda EUC değerlerinin hiperspektral görüntüleme + çok değişkenli algoritmalar ile tahribatsız biçimde tahmin edilebileceğini göstermiş; bu çalışma, spektral tekniklerin kimyasal analiz ve EUC ile entegre kullanıldığında umami değerlendirmesinde güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Bu nedenle NIR ve hiperspektral görüntüleme, tek başına bir “umami ölçer” olmaktan ziyade, HPLC ve EUC gibi referans yöntemlere kalibre edilerek umamiye katkı sağlayan bileşenlerin hızlı tahmini için kullanılan tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmektedir (Bagnasco et al., 2014; Chen et al., 2023; Sun et al., 2023).

6.7. Kombine Yaklaşım

Güncel literatürde umami analizinin tek bir yöntemle güvenilir biçimde açıklanmasının güç olduğu; bu nedenle kombine yaklaşımların tercih edildiği vurgulanmaktadır. Hwang ve arkadaşları (2020), sous-vide dana etinde kimyasal analiz (HPLC ile serbest amino asit ve 5'-nükleotit tayini), EUC hesaplaması ve elektronik dil verilerini birlikte kullanarak umami tadını hem kimyasal hem duyu açıdan karakterize etmiştir. Benzer şekilde Cai ve arkadaşları (2024) ile Zhang ve arkadaşları (2023), soya sosu çalışmalarında elektronik dil, NIR/spektral veriler ve detaylı kompozisyon analizlerini entegre ederek umami profillemesi yapmışlardır. Sun ve arkadaşları (2023) ise hiperspektral görüntüleme ile EUC'yi bir araya getirerek somonda umami yoğunluğunun tahribatsız tahminine örnek oluşturmuştur. Bu bütüncül yaklaşımlar, umaminin kimyasal bileşimi (HPLC, EUC), duyu algısı (panel testleri) ve nesnel sensör çıktıları (e-tongue, NIR, hiperspektral görüntüleme) ile birlikte değerlendirilmesini sağlayarak, gıdaların umami profilinin daha güvenilir ve ayrıntılı biçimde tanımlanmasına olanak tanımaktadır (Kurihara, 2015; You et al., 2024; Hossain et al., 2024).

6.8. Umami Peptitleri ve Aroma Bileşenleri

Umami tadının kimyasal temelleri incelendiğinde, son yıllarda umami peptitleri üzerine yapılan çalışmaların artış gösterdiği dikkat çekmektedir. Geleneksel olarak umami, serbest glutamat ve 5'-nükleotitlerle ilişkilendirilmiş olsa da, güncel araştırmalar bazı kısa zincirli peptitlerin de umami algısına doğrudan ya da dolaylı katkı sağladığını göstermektedir. Bu peptitler genellikle fermentasyon, olgunlaşma ve enzimatik hidroliz süreçleri sırasında proteinlerin parçalanması sonucu oluşmaktadır (Zhao et al., 2016; Mao et al., 2023).

Cai ve arkadaşları (2024), soya sosunda amino asit analizörü ve MALDI-TOF MS tekniklerini kullanarak çok sayıda umami peptidini tanımlamış; bu peptitlerin glutamat ve nükleotitlerle birlikte umami algısını güçlendirdiğini göstermiştir. Mao ve arkadaşları (2023) ise sufu fermentasyonunda mikrobiyal ekolojinin umami peptitlerinin oluşumuna etkisini moleküler düzeyde incelemiş ve fermentasyon sürecinin umami profilini dinamik biçimde şekillendirdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, fermente ürünlerde umami tadının yalnızca serbest amino asitlere değil, kompleks bir peptit karışımına dayandığını göstermektedir.

Umami tadı, duyuusal deneyimde yalnızca tat bileşenleriyle değil, aynı zamanda aroma bileşenleriyle de güçlü etkileşimler göstermektedir. Umami bileşenleri doğrudan uçucu olmamakla birlikte, Maillard reaksiyonları ve lipid oksidasyonu gibi süreçler yoluyla oluşan aroma bileşenlerinin algısal etkisini güçlendirmektedir. Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS) teknikleri, bu aroma bileşenlerinin tanımlanmasında yaygın biçimde kullanılmaktadır (You et al., 2024; Tamura et al., 2022). Xiao ve arkadaşları (2015), tavuk suyu bazı ürünlerde kükürtlü heterosiklik bileşiklerin “etimsi” ve “broth-benzeri” aromalara önemli katkı sağladığını göstermiştir. Bu tür aroma bileşenleri, umami tadının algısal derinliğini ve lezzet bütünlüğünü artırmaktadır.

6.9. Umami Tadının Gıda Formülasyonlarında Kullanımı

Umami tadının gıda formülasyonlarında kullanımı üç ana strateji altında değerlendirilmektedir: doğrudan ekleme, süreç temelli oluşturma ve doğal kaynakların kullanımı. Doğrudan ekleme yaklaşımında MSG, IMP ve GMP gibi umami bileşenleri kontrollü biçimde ürüne ilave edilmektedir. Süreç temelli yaklaşımda ise fermentasyon, enzimatik hidroliz ve Maillard reaksiyonları yoluyla doğal olarak umami bileşenlerinin oluşumu teşvik edilmektedir. Miso, soya sosu, peynir ve fermente et ürünleri bu yaklaşımın tipik örnekleridir. Doğal kaynakların kullanımında ise domates, mantar, et suyu ve balık suyu gibi glutamat ve nükleotit açısından zengin gıdalar tercih edilmektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015).

Umaminin gıda formülasyonlarındaki en önemli işlevlerinden biri, sodyum azaltımı stratejilerinde kullanılabilmesidir. Umami bileşenlerinin tuzluluk algısını güçlendirdiği ve daha düşük sodyum içeren ürünlerde dahi yeterli lezzet yoğunluğunun korunmasına katkı sağladığı gösterilmiştir (Yamaguchi & Takahashi, 1984; Beauchamp, 2009). Bu özellik, özellikle hipertansiyon ve kardiyovasküler hastalık riskinin azaltılmasına yönelik halk sağlığı hedefleri açısından önem taşımaktadır.

Buna ek olarak umami, acı ve istenmeyen tat bileşenlerini maskeleyen özelliği göstermektedir. Fenolik bileşikler veya alkaloidlerden kaynaklanan sert acılıklar, umami bileşenleri sayesinde daha yumuşak ve kabul edilebilir hâle gelebilmektedir. Benzer şekilde yüksek asitli gıdalarda umami, ekşilik algısını dengeleyerek aromatik bütünlüğü artırmaktadır (Kurihara, 2015). Bu özellikler, umaminin modern ürün geliştirme süreçlerinde tat kusurlarını düzeltmeye yönelik çok yönlü bir araç olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, umami tadının ortaya çıkışı ve algılanması; kimyasal bileşim, reseptör düzeyindeki mekanizmalar, duyuşal özellikler ve işleme koşullarının etkileşimi sonucu şekillenen çok katmanlı bir süreçtir. Güncel bilimsel çalışmalar, umaminin yalnızca bir tat artırıcı değil; aynı zamanda lezzet bütünlüğünü sağlayan, ağız dolgunluğunu artıran ve tüketici beğenisini yükselten temel bir lezzet unsuru olduğunu göstermektedir (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015). Tablo 1’de, umami tadının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan duyuşal, kimyasal ve enstrümantal analiz yöntemleri; temel amaçları, uygulama kapsamaları, metodolojik avantajları ve sınırlılıkları açısından karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Tablo 1, umami algısının güvenilir biçimde değerlendirilmesinde tek bir yöntemin yeterli olmadığını ve farklı yaklaşımların birbirini tamamlayıcı nitelik taşıdığını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Umami tadı; serbest amino asitler, 5'-ribonükleotitler ve bunlar arasındaki sinerjik etkileşimlere dayalı çok bileşenli bir yapıya sahip olduğundan, tek bir analiz yöntemiyle tam olarak açıklanamaz. Bu nedenle literatürde, duyuşal analizlerin HPLC temelli kimyasal tayinler ve Eşdeğer Umami Derişimi (EUC) gibi hesaplamalı modellerle birlikte kullanılması önerilmektedir. Elektronik dil ve spektral teknikler ise doğrudan tat ölçümü yapmamakla birlikte, referans kimyasal yöntemlere kalibre edilerek umami profilinin hızlı, nesnel ve tahribatsız biçimde tahmin edilmesine olanak tanımaktadır (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015; Hwang et al., 2020; You et al., 2024).

Tablo 1. *Umami Tadının Değerlendirilmesinde Kullanılan Bazı Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Yamaguchi & Ninomiya, 2000; Kurihara, 2015; You et al., 2024)*

NIR / Hiperspektral	Elektronik Dil (e-tongue)	EUC	HPLC	Duyusal Analiz	Yöntem
Umamiyle ilişkili bileşenlerin dolaylı tahmini	Tat profillerinin nesnel sınıflandırılması	Umami yoğunluğunun MSG eşdeğeri olarak hesaplanması	Serbest amino asitler ve 5'- nükleotitlerin nicel tayini	Umami algısının insan duyusu üzerinden değerlendirilmesi	Temel Amaç
Spektral- kimyasal modelleme	Sensör dizileri ile örüntü tanıma	Glutamat- nükleotit sinerjisinin modellenmesi	Glutamat, IMP, GMP, AMP analizleri	Eğitilmiş panelistler ile tat yoğunluğu, kalıcılık ve ağız dolgunluğunun ölçümü	Uygulama Kapsamı
Tahribatsız ve hızlı	Hızlı ve operatör bağımsız	Ürünler arası karşılaştırma sağlar	Yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik	Gerçek duyusal algıyı yansıtır	Avantajlar
Dolaylı ölçüm	Kalibrasyon gerekir	Varsayımsal katsayılarla dayanır	Zaman alıcı, maliyetli	Öznel; panel eğitimi gerektirir	Sınırlılıklar
Endüstriyel hat içi izleme	Kalite kontrol ve ön tarama	Fermente ve et ürünlerinde umami potansiyeli	Umami bileşenlerinin kimyasal karakterizasyonu	Umami algısının tanınması ve duyusal doğrulama	Literatürde Kullanım Alanı

Tablo 2’de yer alan yöntemler, umami bileşenleri ve özellikle umami özellik gösteren peptitlerin analizinde literatürde yaygın olarak kullanılan çok aşamalı analitik yaklaşımları temsil etmektedir. Güncel çalışmalar, güvenilir bir umami tanımlaması için enzimatik hidroliz ve kromatografik ayırma gibi kimyasal analizlerin; duyuusal doğrulama, tat eşiği ölçümleri ve moleküler docking gibi tamamlayıcı yöntemlerle birlikte kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, umami algısının yalnızca kimyasal bileşim üzerinden değil, aynı zamanda reseptör düzeyindeki etkileşimler ve duyuusal karşılıklar çerçevesinde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Tablo 2’de, umami algısına katkı sağlayan serbest amino asitler, 5'-ribonükleotitler ve özellikle umami özellik gösteren peptitlerin belirlenmesinde kullanılan başlıca analitik yöntemler; kullanım amaçları, analitik üstünlükleri, metodolojik sınırlılıkları ve literatürdeki tipik uygulama örnekleriyle birlikte özetlenmektedir.

Tablo 2. Umami Bileşenleri ve Peptitlerinin Analizinde Kullanılan Yöntemler, Avantajları, Sınırlılıkları ve Örnek Literatür

Analitik Yöntem	Temel Kullanım Amacı	Avantajları	Sınırlılıkları	Örnek Literatür (APA 6)
Enzimatik hidroliz (Papain, Flavourzyme, Alcalase)	Protein matrislerinden umami peptitlerinin açığa çıkarılması	Kontrollü peptit oluşumu; endüstriyel uygulanabilirlik	Peptit profili enzim ve koşullara duyarlıdır; aşırı hidroliz acılık oluşturabilir	Deng ve ark., 2021; Kong ve ark., 2019
Ultrafiltrasyon	Moleküler ağırlığa göre ön fraksiyonlama	Hızlı ve düşük maliyetli ön ayırma	Seçicilik sınırlıdır	Liu ve ark., 2015
Jel filtrasyon kromatografisi	Peptitlerin boyuta göre ayrılması	Yapısal bütünlüğü korur	Düşük çözünürlük, uzun analiz süresi	Kong ve ark., 2019
Ters faz sıvı kromatografisi (RP-HPLC)	Umami aktif fraksiyonların saflaştırılması	Yüksek ayırma gücü, MS uyumluluğu	Organik solven t kullanımı, örnek kaybı	Deng ve ark., 2021; Gao ve ark., 2022
Nano-HPLC-MS/MS	Düşük konsantrasyonlu umami peptitlerinin tanımlanması	Çok yüksek hassasiyet, kısa peptitler için ideal	Yüksek cihaz maliyeti, uzmanlık gereksinimi	He ve ark., 2023; Gao ve ark., 2022
LC-Q-TOF-MS/MS	Moleküler kütle ve fragmentasyon analizi	Yüksek kütle doğruluğu	Veri analizi karmaşıktır	Liang ve ark., 2022; Kong ve ark., 2019

Ion-pair LC-MS	Glutamat ve nükleotit türevlerinin analizi	Polar bileşikler için uygun	Mobil faz optimizasyonu zordur	Coulier ve ark., 2011
Duyusal analiz (eğitilmiş panel)	Umami algısının doğrulanması	Kimyasal- duyusal ilişki kurar	Öznel değerlendirme içerir	Liang ve ark., 2022
Tat eşiği (threshold) ölçümü	Umami etkinliğinin nicel değerlendirilmesi	Karşılaştırmalı güç sağlar	Gerçek tüketim koşullarının tam yansıtmayabilir	Liang, Chen ve Li, 2021
Moleküler docking (T1R1/T1R3)	Peptit-r eseptör etkileşiminin modellenmesi	Mekanizma düzeyinde açıklama	Simülasyon temellidir	Gao ve ark., 2022; He ve ark., 2023

Umami tat algısından sorumlu bileşiklerin ve özellikle umami özellik gösteren peptitlerin belirlenmesi, gıda matrislerinin karmaşık yapısı nedeniyle çok aşamalı ve entegre analitik yaklaşımların kullanılmasını gerektirmektedir. Güncel gıda mühendisliği literatüründe bu süreçler genellikle kontrollü enzimatik hidroliz ile başlamakta; elde edilen hidrolizatlar ultrafiltrasyon ve kromatografik ayırma teknikleriyle fraksiyonlanmakta ve ardından yüksek hassasiyetli kütle spektrometrik sistemler (Nano-HPLC-MS/MS, LC-Q-TOF-MS/MS) ile yapısal olarak tanımlanmaktadır. Bu teknik kombinasyonlar, düşük molekül ağırlıklı ve düşük derişimli umami peptitlerinin güvenilir biçimde saptanmasına olanak tanırken, ion-pair sıvı kromatografisi gibi tamamlayıcı yaklaşımlar polar glutamat ve nükleotit türevlerinin analiz doğruluğunu artırmaktadır (Coulier ve ark., 2011; de Rijke ve ark., 2007; Kong ve ark., 2019; Deng ve ark., 2021; Gao ve ark., 2022; He ve ark., 2023). Kimyasal tanımlamayı takiben uygulanan duysal analizler ve moleküler docking çalışmaları ise peptitlerin T1R1/T1R3 reseptörleriyle etkileşimlerini ortaya koyarak, yapısal bulguların fonksiyonel umami algısı ile ilişkilendirilmesini sağlamaktadır (Liang ve ark., 2022; Gao ve ark., 2022).

Sonuç olarak, umami tadının güvenilir biçimde değerlendirilmesi, duysal analizler, kimyasal tayinler (HPLC), EUC hesaplamaları ve sensör/spektral tekniklerin entegre kullanıldığı bütüncül yaklaşımlar gerektirmektedir. Bu yaklaşımlar, umaminin kimyasal temelleri ile duysal algısı arasındaki ilişkinin daha net biçimde ortaya konmasını sağlamaktadır. Umaminin gıda bilimi, gastronomi ve halk sağlığı bağlamındaki önemi; doğal kaynaklarının çeşitliliği ile analiz ve ölçüm yöntemlerinde yaşanan teknolojik gelişmeler doğrultusunda giderek artmaktadır. Bu kapsamda, duysal analizler, HPLC tabanlı kimyasal tayinler, Eşdeğer Umami Derişimi (EUC) hesaplamaları, elektronik dil sistemleri ve spektral tekniklerin entegre biçimde kullanılması, umami tadının güvenilir ve bütüncül değerlendirilmesi açısından temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Sonuç

Umami tadı, geleneksel dört temel tat dışındaki beşinci temel tat olarak bilimsel temelleriyle kabul edilmiştir. Kikunae Ikeda'nın L-glutamik asidi tanımlamasıyla başlayan süreç, 5'-ribonükleotitlerin keşfi ve T1R1-T1R3 heterodimer reseptörlerinin belirlenmesiyle fizyolojik temellerini kazanmıştır. Umaminin kimyasal temeli serbest L-glutamat, 5'-ribonükleotitler ve kısa zincirli peptitlerin sinerjik etkisine dayanır. Bu bileşenlerin gıdalardaki dağılımı, biyolojik köken ve işleme koşullarına bağlı olarak değişir. Umami algısı, çoklu reseptör sistemleri ve merkezi sinir sistemi sinyal entegrasyonu ile duyuşal deneyime dönüşür. Umami, lezzet yoğunluğunu artırırken tuz kullanımını azaltma potansiyeline sahiptir ve gıda teknolojisi ile gastronomide stratejik bir bileşen olarak önem taşımaktadır. Umami bileşenlerinin analizi için duyuşal değerlendirmeler, HPLC, EUC hesaplamaları, elektronik dil ve spektral tekniklerin entegre kullanımı gereklidir.

Öneriler

- Gıda endüstrisi ve gastronomi alanında, doğal umami kaynakları (fermente soslar, domates, mantar, deniz ürünleri) kullanılarak düşük sodyumlu, yüksek lezzet yoğunluğuna sahip ürünler geliştirilmeli.- Kamu sağlığı politikalarında, umami temelli beslenme rehberleri ve eğitim programları hazırlanarak sodyum tüketimi azaltılmalı; özellikle yaşlılar ve hipertansiyon riski taşıyan gruplar hedeflenmeli.- Ev mutfağında, tuz yerine uzun süreli pişirme, fermentasyon ve doğal umami kaynakları tercih edilerek dengeli ve tatmin edici lezzet profilleri oluşturulmalı.- Akademik araştırmalarda, Türk mutfağındaki umami bileşenleri sistematik olarak analiz edilmeli; yerel fermentasyon süreçleri ve umami peptitleri incelenmeli; umami reseptörlerinin popülasyonlar arası farklılıkları ve duyuşal algı etkileri araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Bagnasco, L., Mattarozzi, M., Di Pellegrina, A., Careri, M., & Mangia, A. (2014). Application of a voltammetric electronic tongue and near infrared spectroscopy for a rapid umami taste assessment. *Food Chemistry*, 157, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.044>
- Beauchamp, G. K. (2009). Sensory and receptor responses to umami: An overview of pioneering work. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 90(3), 723S–727S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2009.27462I>
- Cai, T., Hai, N., Guo, P., Feng, Z., Zhang, Y., Wang, J., Yu, Z., Liu, H., & Ding, L. (2024). Characteristics of umami taste of soy sauce using electronic tongue, amino acid analyzer, and MALDI-TOF MS. *Foods*, 13(14), 2242. <https://doi.org/10.3390/foods13142242>
- Chaudhari, N., & Roper, S. D. (2010). The cell biology of taste. *The Journal of Cell Biology*, 190(3), 285–296. <https://doi.org/10.1083/jcb.201003144>
- Chen, X., Yang, Y., & Zhao, J. (2023). Near-infrared spectroscopy of Chinese soy sauce for quality evaluation. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 15(3), 71–82. <https://doi.org/10.15586/qas.v15i1.1177>
- Fuke, S., & Konosu, S. (1991). Taste-active components in some foods: A review of Japanese research. *Physiology & Behavior*, 49(5), 863–868. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(91\)90183-7](https://doi.org/10.1016/0031-9384(91)90183-7)
- Fuke, S., & Ueda, Y. (1996). Interactions between umami and other flavor characteristics. *Trends in Food Science & Technology*, 7(12), 407–411. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(96\)10053-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(96)10053-1)
- Giacometti, T. (1979). Free and bound glutamate in natural products. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 12, 1–5.
- Hwang, Y.-H., Ismail, I., & Joo, S.-T. (2020). Identification of umami taste in sous-vide beef by chemical analyses, equivalent umami concentration, and electronic tongue system. *Foods*, 9(3), 251. <https://doi.org/10.3390/foods9030251>
- Ikeda, K. (1908). New seasonings. *Journal of the Chemical Society of Tokyo*, 30, 820–836.
- Ikeda, K. (1908). Seasoning (Japanese Patent No. 4805). Japan Patent Office.
- Kawai, M., Okiyama, A., & Ueda, Y. (2002). Taste enhancements between various amino acids and IMP. *Chemical Senses*, 27(8), 739–745. <https://doi.org/10.1093/chemse/27.8.739>
- Kawai, M., Uneyama, H., & Miyano, H. (2009). Taste-active components in foods, with concentration on umami compounds. *Journal of Health Science*, 55(5),

667–673. <https://doi.org/10.1248/jhs.55.667>

Kodama, S. (1913). On the taste of salts. *Journal of the Chemical Society of Tokyo*, 34, 751–757.

Kurihara, K. (2009). Glutamate: From discovery as a food flavor to role as a basic taste (umami). *The American Journal of Clinical Nutrition*, 90(3), 719S–722S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2009.27462H>

Kuninaka, A. (1960). Studies on taste of ribonucleic acid derivatives. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 34, 487–492.

Kuninaka, A. (1964). Nucleotides and related compounds as umami substances. *Journal of Food Science*, 29(2), 147–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1964.tb01780.x>

Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices* (2nd ed.). New York, NY: Springer.

Liu, T.-T., Xia, N., Wang, Q.-Z., & Chen, D.-W. (2019). Identification of the non-volatile taste-active components in crab sauce. *Foods*, 8(8), 324. <https://doi.org/10.3390/foods8080324>

Mao, J., Zhou, Z., & Yang, H. (2023). Microbial succession and its effect on the formation of umami peptides during sufu fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1181588. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1181588>

McSweeney, P. L. H., & Sousa, M. J. (2000). Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening. *Le Lait*, 80(3), 293–324. <https://doi.org/10.1051/lait:2000127>

Nakashima, K., Eddy, M. C., Katsukawa, H., Delay, E. R., & Ninomiya, Y. (2012). Behavioral responses to glutamate receptor agonists and antagonists implicate the involvement of brain-expressed mGluR4 and mGluR1 in taste transduction for umami in mice. *Physiology & Behavior*, 105(3), 709–719. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.09.028>

Nelson, G., Chandrashekar, J., Hoon, M. A., Feng, L., Zhao, G., Ryba, N. J. P., & Zuker, C. S. (2002). An amino-acid taste receptor. *Nature*, 416(6877), 199–202. <https://doi.org/10.1038/nature726>

Nishimura, T., & Kato, H. (1988). Taste of free amino acids and peptides. *Food Reviews International*, 4(2), 175–194. <https://doi.org/10.1080/87559128809540828>

Ren, S., Zheng, E., Zhao, T., Hu, S., & Yang, H. (2022). Evaluation of physicochemical properties, equivalent umami concentration and antioxidant activity of *Coprinus comatus* prepared by different drying methods. *LWT*, 162, 113479. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113479>

San Gabriel, A., Maekawa, T., Uneyama, H., & Torii, K. (2009). Metabotropic gluta-

- mate receptor type 1 in taste tissue. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 90(3), 743S–746S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2009.27462I>
- Shim, J., Son, H. J., Kim, Y., Kim, K. H., Kim, J. T., Moon, H., & Kim, K. H. (2015). Modulation of umami taste by umami peptides. *Journal of Food Science*, 80(2), S389–S395. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12775>
- Stone, H., & Sidel, J. L. (2004). *Sensory evaluation practices* (3rd ed.). San Diego, CA: Academic Press.
- Toko, K. (2000). Taste sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 64(1–3), 205–215. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00508-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00508-0)
- Toko, K. (2013). *Biomimetic sensor technology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Wang, Y., You, Z., Bai, Y., Bo, D., Feng, Y., Shen, J., & Li, J. (2024). A review of taste-active compounds in meat: Identification, influencing factors, and taste transduction mechanism. *Journal of Food Science*, 89(12), 8128–8155. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17480>
- Yamaguchi, S. (1998). Basic properties of umami and its effects on food flavor. *Food Reviews International*, 14(2–3), 139–176. <https://doi.org/10.1080/87559129809541156>
- Yamaguchi, S., & Ninomiya, K. (2000). Umami and food palatability. *The Journal of Nutrition*, 130(4), 921S–926S. <https://doi.org/10.1093/jn/130.4.921S>
- Yamaguchi, S., Yoshikawa, T., Ikeda, S., & Ninomiya, T. (1971). Measurement of the relative taste intensity of some L- α -amino acids and 5'-nucleotides. *Journal of Food Science*, 36(6), 846–849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1971.tb15541.x>
- Zhang, J., Zhao, X., Li, L., Chen, W., Zhao, Q., Su, G., & Zhao, M. (2023). Application of electronic tongue in umami detection and soy sauce refining process. *Food Chemistry: X*, 18, 100652. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100652>
- Zhang, Y., Hoon, M. A., Chandrashekar, J., Mueller, K. L., Cook, B., Wu, D., Zuker, C. S., & Ryba, N. J. P. (2003). Coding of sweet, bitter, and umami tastes: Different receptor cells sharing similar signaling pathways. *Cell*, 112(3), 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2003.01.019>
- Zhao, C. J., Schieber, A., & Gänzle, M. G. (2016). Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations – A review. *Food Research International*, 89, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.042>



**GIDALARDA
MİKOTOKSİNLERİN BİRLİKTE
BULUNMASI VE MARUZİYET
RİSKİ**

“ ”

Cavidan DEMİR GÖKİŞİK¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Cavidan DEMİR GÖKİŞİK

Giriş

Mikotoksinler, hasattan önce ve sonra gıda ve yemleri kirleten küfler tarafından üretilen ikincil toksik metabolitlerdir. Mikotoksinler ve çok sebze-lerde çıkarılanların yanında, kuruyemişler, yağlı tohumlar, meyveler, kuru meyveler, sebzeler, kahve ve kakao çekirdekleri, içecekler (şarap, bira ve elma suyu) ile baharat ve bitkilerde de bulunur. Hayvanların mikotoksinleri ile kir-lenmiş yem tüketimi Sonuç et, süt, yumurta ve süt ürünleri gibi hayvansal gıdalarda da mikotoksin bulunma olasılığı yüksektir (Ullah ve ark., 2025). Bu bölümü yazmamın temel nedeni, 2020-2023 yılları arasında mısır bazlı ürün-lerde yaptığım fumonisin araştırmamda çok yüksek fumonisin düzeylerinin bulunmuş olmasıdır (Gökişik ve Kahtalı, 2023). İkincil neden ise yüksek fu-monisin seviyelerinin diğer mikotoksinlerin mevcut olma olasılığının yüksek olduğunu göstermesidir. Bir üründe bir mikotoksin mevcutsa diğerlerinin de bulunma olasılığı yüksektir.

Mikotoksinler, 1960’larda hastalıktan beri tüm dünyada gıda zararlılı-ğını tehdit eden bir sorundur (WHO, 2018). Mikotoksinlerin tarla aşamasın-da *Fusarium* spp., depolama aşamasında ise başta *Aspergillus* ve *Penicillium* türleri tarafından üretildiği belgelenmiştir. Şu anda bilinen tüm mikotoksin-ler arasında, gücü bilinen gıda güvenliği ve ekonomik açıdan önemli olan sadece birkaç mikotoksin grubu vardır; bunlar, esas olarak *Aspergillus* türleri tarafından üretilen aflatoksinler (AF’ler); *Aspergillus* ve *Penicillium* türleri tarafından üretilen okratoksin A (OTA); *Penicillium expansum* tarafından üretilen patulin ve öncelikle birçok *Fusarium* türü tarafından üretilen zeara-lenon (ZEA), fumonisinler (özellikle FB1 ve FB2) ve trikoteksenler (TCT’ler) (özellikle deoksinivalenol (DON)) (Smith ve ark., 2016). Ayrıca *Fusarium* tü-rünün çeşitli türlerinin olduğu tabeavericin (BEA), enniatinler (ENN’ler) ve moniliformin (MON) gibi tahriş edici hücrelere sahip daha az çalışılmış popülasyonlar vardır (Jestoi, 2008).

Mikotoksinlere maruziyet, insanlarda ve hayvanlarda hepatotoksik, ge-notoksik, immünosupresif, östrojenik, nefrotoksik, teratojenik ve/veya kan-serojenik etkiler gibi çeşitli kronik etkilere ve mikotoksikozis olarak bilenen toplu ölümlerle sonuçlanan akut etkilere neden olduğu iyi bilinir. (Smith, 2016). Aflatoksinlerden sonra en toksik özellik gösteren fumonisinler, atlarda lökensefalomalazi (ELEM) ve domuzlarda akciğer ödemi (PPE) salgınlarının, insanlarda özefagus kanseri, T-2 toksininin neden olduğu Alimenter Toksik Aleukia, domuz ve tavuklarda nefropati, insanda Balkan Endemik Nefropa-tisi, ergotizm ve 1990-1991 yıllarında Meksika-Teksas sınır boyunca, hamile kadınların yüksek fumonisinlere maruziyeti nedeniyle yenidoğanlarda yaşı-anan nöral tüp defektleri (NTD) geçmişte bilinen mikotoksikozis vakalarıdır (Marasas ve ark., 2004; Stoev, 2024). Sahra-altı Afrika’da epidemiyolojik ola-rak çocuklarda gelişim geriliği önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir (Yli-Mattila ve Sundheim, 2022; Chen ve ark., 2018; Ekwomadu

ve ark., 2020). Dünya genelinde mikotoksin kontaminasyonu insan ve hayvan sağlığı için önemli riskler oluşturma yanında önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Örneğin FAO'nun tahminlerine göre dünya mahsullerinin yaklaşık %25'i mikotoksinlerden etkilenmekte ve bunun sonucunda yılda yaklaşık 1 milyar ton ürün kaybolmaktadır (Eskola et al.,). Bu oran son yıllarda çok daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir (Stoev, 2024).

Mikotoksinlere maruziyet, insanlarda ve hayvanlarda hepatotoksik, genotoksik, immünosupresif, östrojenik, nefrotoksik, teratojenik ve/veya kanserojen etkiler gibi çeşitli kronik etkilere ve mikotoksikozis olarak bilenen toplu ölümlerle sonuçlanan akut etkilere neden olduğu biliniyor (Smith ve ark., 2016). Aflatoksinlerden sonra en toksik özellik gösteren fumonisinler, atlarda lökensefalomalazisi (ELEM) ve domuzlarda akciğer ödemi (PPE) salgınlarının, insanlarda özefagus kanseri, T-2 toksininin neden olduğu Alimenter Toksik Aleukia, domuz ve tavuklarda nefropati, insanda Balkan Endemik Nefropatisi, ergotizm ve 1990-1991 yıllarında Meksika-Teksas sınır boyunca, hamile kadınların yüksek fumonisinlere maruziyeti nedeniyle yenidoğanlarda yaşanan nöral tüp defektleri (NTD) geçmişte bilinen mikotoksikozis vakalarıdır (Marasas ve ark., 2004; Stoev, 2024). Sahraaltı Afrika'da epidemiyolojik olarak çocuklarda gelişim geriliği önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir (Yli-Mattila ve Sundheim, 2022; Chen ve ark., 2018; Ekwo-madu ve ark., 2020). Dünya genelinde mikotoksin kontaminasyonu insan ve hayvan sağlığı için önemli riskler oluşturma yanında önemli ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Örneğin FAO'nun tahminlerine göre dünya mahsullerinin yaklaşık %25'i mikotoksinlerden etkilenmekte ve bunun sonucunda yılda yaklaşık 1 milyar ton ürün kaybolmaktadır (Eskola et al., 2020). Bu oran son yıllarda çok daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir (Stoev, 2024).

Mikotoksinlerin en bilinen toksik etkileri arasında nefrotoksik (esas olarak OTA ve FB1), nörotoksik (esas olarak FB1), immünosupresif (esas olarak OTA, AFB1, DON ve T-2 toksini), genotoksik (esas olarak AFB1, OTA, T-2), karsinojenik (esas olarak AFB1, OTA ve FB1) ve östrojenik (ZEA) etkiler bulunur (WHO, 2011; Stoev, 2023). Mikotoksinlerden en toksik ve kanserojen olduğu bilinen Aflatoksinler' den AFB1 ve Fumonisinler' den FB1' dir. AFB1, IARC (Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı) tarafından Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırılmıştır (IARC, 2002; 2012). Fumonisinler' den FB1, hayvanlar ve insanlar için en toksik olan ve mısırdaki en bol bulunan toksindir (Gelderblom vd., 1988; 2008; Marasas ve ark., 2004) ve deney hayvanlarında hepatokarsinogenez, mutajenik, genotoksik ve nefropatiye neden olmaktadır (Geldeblom ve ark., 1992; Marasas ve ark., 2004). FB1'in insanlarda kanser tetikleyicisi olduğu bildirilmiştir (Gelderblom ve ark., 1988; 2008) ve mısır tüketiminin yüksek olduğu dünyanın birçok bölgesinde insanlarda yemek borusu kanserinin nedeni olduğu kuvvetle düşünülmektedir (Marasas ve ark., 2004; Alizadeh ve ark., 2012; IARC, 2017; Shephard ve ark., 2020). FB1'in

toksik özelliklerini bildiren birçok çalışmadan en dikkat çekici olanları, bağıışıklık sistemini baskılayıcı ve yenidoğanda nöral tüp defektleridir (Missmer ve ark. 2006; Gelderblom ve ark., 2008). Bu çalışmalar ışığında, fumonisinler özellikle FB1, IARC tarafından Grup 2B olarak sınıflandırılmış (IARC, 2002). Tablo 1' de IARC tarafından mikotoksinlerin kanserojenik sınıflandırılması verilmiştir. IARC, maddeleri kanser riskine göre aşağıdaki gruplara ayırır:

Group 1: İnsan için kanserojen

Group 2A: Muhtemelen insan için kanserojen

Group 2B: İnsan için olası kanserojen

Group 3: İnsan için sınıflandırılmamış (kanıt yetersiz)

Group 4: Muhtemelen kanserojen değil

(Evrensel IARC sınıfları hakkında genel liste: Group 1–4)

Tablo 1. IARC tarafından mikotoksinlerin kanserojenik sınıflandırılması (IARC, 2002)

Mikotoksin	IARC Grubu	Açıklama / Etki
AflatoksinB1 (AFB1)	Group 1	İnsan için kanserojen. Özellikle karaciğer kanseri ile ilişkilendirilmiş en güçlü kanser riskli mikotoksindir.
Aflatoksin B2, G1, G2, M1	<i>Bazılistelemelerde Group 1 veya Group 2B</i>	Aflatoksinler genelde Grup 1 başlığı altında değerlendirilir; AFM1'in insan kanserojenliği kanıtlarda daha zayıftır ama yine riskli bulunmuştur.
OchratoksinA (OTA)	Group 2B	İnsan için <i>olası</i> kanserojen. Böbrek ve karaciğer üzeri etkilerle ilgili endişeler vardır.
Fumonisin B1 / B2	Group 2B	İnsan için <i>olası</i> kanserojen. Deney hayvanlarında kanserle ilişkili etkiler görülmüştür.
Sterigmatocystin	Group 2B	Olası kanserojen olarak değerlendirilir.
Deoksinivalenol (DON)	Group 3	İnsan için kanser yapıcı etki açısından sınıflandırılmaz (kanıt yetersiz).
Patulin	Group 3	Kanserojenlik kanıtı yetersiz.
Citrinin	Group 3	Kanserojenlik için yeterli veri yok.
Zearalenone (ZEA)	Group 3	<i>Kanserojen olarak sınıflandırılmamış.</i>

İnsanlar, esas olarak bitkisel ve hayvansal kaynaklı gıda alımı yoluyla sürekli olarak mikotoksinlere (örneğin aflatoksinler, okratoksinler ve fumonisinler) maruz kalmaktadır. Mikotoksinlerden kaynaklanan sağlık riskleri, özellikle kanserojenlikleri olmak üzere, toksisitelerinden kaynaklanabilir. Bu riskleri önlemek amacıyla, Lyon'daki (Fransa) Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), IARC Monografları programı aracılığıyla, epidemiyolojik veriler, deney hayvanlarında kanser çalışmaları ve mekanistik çalışmalar temelinde, bazı mikotoksinlerin insanlarda kanserojen tehlike değerlendirmesini gerçekleştirir. Bu bölüm, özellikle aflatoksinler (aflatoksin B1, B2, G1,

G2 ve M1), fumonisinler (fumonisin B1 ve B2) ve okratoksin A (OTA) olmak üzere, bu mikotoksinlerin kanserojen tehlike değerlendirmelerini özetlemektedir. https://www.iarc.who.int/reference/mycotoxins-as-human-carcinogens-the-iarc-monographs-classification/?utm_source erişim:22.12.2025

Mikotoksinler için yasal düzenlemeleri

Yasal düzenlemeleri, bazı ticaret bölgelerinde uyumlaştırma çabaları yürütülüyor olsa bile, devletler arasında farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, bu uyumlaştırma, dünyanın çeşitli bölgelerindeki kontaminasyon seviyeleri ve beslenme alışkanlıklarındaki farklılıklar nedeniyle insan sağlığının korunması açısından mutlaka faydalı olmayacaktır (Stoev, 2024). Gelişmiş dünyada, diyet yoluyla maruz kalma, JECFA tarafından belirlenen mikotoksin tolerans sınırlarının ve tolere edilebilir günlük alım miktarlarının altındadır (Soraia ve ark., 2024), ancak gelişmekte olan ülkeler için durum her zaman böyle değildir. Sahra altı Afrika (Yli-Mattila ve Sundheim, 2022; Chen ve ark., 2018; Ekwomadu ve ark., 2020; Reinhold ve ark., 2024), Güney Amerika (Andrade ve ark., 2018; Cabrera Meraz ve ark., 2021) ve Doğu Asya (Yang ve ark., 2019; Song ve ark., 2025) gibi gelişmekte olan bölgelerden bildirilen raporlarda bebeklerde ve çocuklarda mikotoksin maruziyeti limitlerin çok üzerinde bildirilmektedir. Çocuklarda Mikotoksin maruziyeti yaşayan bölgelerde yapılan epidemiyolojik çalışmalar çocuklarda gelişim geriliği (bodurluk, zihinsel gerilik, nörolojik bozukluklar vs.) ve bebeklerde nöral tüp defektleri ve doğumsal farklı anomaliler bildirilmektedir (Gelderblom ve ark., 2008; Misser ve ark., 2006). Aynı zamanda bu bölgelerde görülen özefagus kanseri ve akciğer kanseri oranının yüksek bulunması mikotoksin maruziyeti ile ilişkilidir (Gelderblom ve ark., 1988; Burger ve ark., 2010; Alizadeh ve ark., 2012; Shephard ve ark., 2019; Sun ve ark., 2023; Reinhold ve ark., 2024). Dahası bu bölgelerde tüm bireylerde tahıllar ana besin maddesidir ve mikotoksinlerin yüksek oranlarda tahıllarda oluşması önemli bir halk sağlığı sorunudur. Bu ülkelerden gelen raporlarda tahıllarda mikotoksin oranlarının çok yüksek bulunmasıdır. Örneğin mısırda yapılan fumonisin çalışmalarında, Cezayir'den FB1 için 14.812 µg kg⁻¹ ve FB2 için 8603 µg kg⁻¹, Benin'den fumonisin 8240–16,690 µg kg⁻¹, Kamerun'dan 300 - 26,000 µg kg⁻¹, Nijerya'dan 50–8400 µg kg⁻¹ ve Kongo'dan 603,000 µg kg⁻¹ gibi (Yli-Mattila ve Sundheim, 2022) çok yüksek seviyeler bildirilmiştir. Ek olarak, artan dünya nüfusu ve özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki yoğun tarım üretimi ve tüketimi nedeniyle, mikotoksinlere aşırı maruz kalan dünya nüfusunun sayısı önümüzdeki birkaç yıl içinde artabilir (Stoev, 2024). FAO'nun 2003 yılındaki son araştırmasına göre, dünya genelinde yaklaşık 100 ülke (dünya nüfusunun yaklaşık %87'sini temsil eden) gıda ve/veya yemlerdeki mikotoksinler veya mikotoksin grupları için düzenlemelere veya ayrıntılı kılavuzlara sahiptir. Mikotoksin limitlerinin belirlenmesinde rol oynayan bilimsel, ekonomik ve politik faktörler de dahil olmak üzere çeşitli faktörler nedeniyle, izin verilen limitler ve mevzuatla he-

deflenen mikotoksinler ülkeden ülkeye değişmektedir (Stoev, 2024).

İnsanları ve hayvanları mikotoksinlerin toksik risklerinden korumak için birçok ülke, mikotoksinlere maruz kalmayı sınırlayan düzenlemeler oluşturmuştur. Mikotoksinlerin olumsuz sağlık etkileri, akut zehirlenmeden bağışıklık yetmezliği ve kanser gibi uzun vadeli etkilere kadar uzanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından ortaklaşa oluşturulan ve JECFA olarak adlandırılan bilimsel uzman komitesi, mikotoksinler de dahil olmak üzere doğal toksinlerden kaynaklanan sağlık risklerini değerlendirmekten sorumlu uluslararası kuruluştur (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins>).

Belirli gıdalardan kaynaklanan mikotoksinlere maruz kalmayı sınırlamaya yönelik uluslararası standartlar ve uygulama kuralları, JECFA değerlendirmelerine dayanarak Codex Alimentarius Komisyonu tarafından belirlenmiştir. Tablo 1 ve 2'de Avrupa Komisyonu (EC) tarafından belirlenen maksimum limitler verilmiştir. Oluşumları ve toksik etkileri nedeniyle, başlıca mikotoksinler (örneğin, AF'ler, OTA, ZEA, FUM ve DON) birçok ülkede yasal düzenlemelerin veya kılavuzların odak noktasıdır. Mikotoksinlerin bilinen en yaygın toksik etkileri AF'ler arasında en toksik olan AFB1 ve metaboliti olan AFM1 kanserojeniktir (Stoev, 2024). Uluslararası / Dünya Standartları, Avrupa Birliği (EU) ve U.S. Food and Drug Administration (FDA) mikotoksinlerin maksimum limitlerini çalışmalar ışığında düzenler, bazı ülkelerde kendi standartları vardır. Ancak uluslararası geçerliliği olan EC (2006) ve FDA (2015) standartlarıdır; yenisi, EC Yönetmeliği Regulation EC 2023/915 gibi düzenlemeler: FDA özellikle aflatoksin gibi mikotoksinler için toleranslar belirleyen gıda ve yem programları yürütür. Dünya Sağlık Örgütü (FAO/WHO) ve FAO'nun bilimsel danışma organı olan Gıda Katkı Maddeleri Ortak Uzman Komitesi (JECFA), mikotoksin risklerini değerlendirir. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği'nde, mikotoksinler için düzenleyici ve tavsiye edilen kılavuzlar sırasıyla FDA ve EC tarafından, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA)'nın tavsiyesiyle yayınlanmaktadır. Hayvan ve insan tüketicilerini korumak için, bu düzenlemeler, zararlı olmamalarını sağlamak amacıyla gıda ve yemlerde düzenleyici maksimum değerleri belirlemiş ve iyi tarım uygulamalarını önermiştir. Örneğin, EC düzenleyici limitlerinin maksimum limitler (ML), insan bebekleri ve küçük çocuklar için işlenmiş tahıl bazlı gıdalarda aflatoksin B1 (AFB1) için 0,1 µg/kg, fumonisin 200 µg/kg, insan tüketimi için işlenmemiş mısırdaki fumonisin B1 ve B2 için 4000 µg/kg'a, mısır cipsi gibi işlenmiş üründe fumonisin 800 µg/kg ML belirlenmiştir (JECFA, 2012). Süt ve süt bazlı ürünler söz konusu olduğunda, ML'ler aflatoksin M1 için 0,05 µg/kg'dır (EC, 2023).

Tablo 2. EC/ EFSA tarafından belirlenen Mikotoksinlerin Maksimum Limitleri (EC, 2023)

Mikotoksin	Gıda	Maksimum Limit (µg/kg)
Aflatoksinler (sum)	Kuruyemişler, tahıllar vb.	~4–10 µg/kg
Fumonisin	Mısır ve ürünleri	200–800 µg/kg (çeşitli ürünlerde)
Ochratoxin A	Tahıllar/ürünler	~0.5–20 µg/kg
Patulin	Elma suyu vb.	~10–50 µg/kg
Zearalenone	Ekmek, tahıllar	~50–75 µg/kg

Tablo 3. Bebekler ve küçük çocuk gıdaları için maksimum mikotoksin limitleri (EC, 2023)

- Aflatoksin B1: 0,10 µg/kg
- Aflatoksin M1: 0,025 µg/kg;
- Okratoksin A: 0,5 µg/kg ve özellikle bebekler için özel tıbbi amaçlı diyet gıdalarında aynı maksimum seviye;
- Patulin: 10 µg/kg;
- Deoksinivalenol: 200 µg/kg;
- Zearalenon: 20 µg/kg ve bebekler ve küçük çocuklar için mısır bazlı formüllerde aynı seviye;
- Fumonisinler: Bebekler ve küçük çocuklar için mısır bazlı formüllerde 200 µg/kg.

EC bebekler ve çocuklar için çok daha düşük limitler koymuştur. Hamileler, bebekler ve çocuklar toksinlere çok daha duyarlıdır. Hamilelerin toksinlere maruziyeti fetüs de gelişim geriliğine ve birçok anomaliye neden olur. Bebekler ve çocukların vücut ağırlığına göre daha yüksek “gıda miktarı / vücut ağırlığı” oranına aldıkları toksin çok daha fazla. Sinir-doku ve beyin gelişimi, bağışıklık sistemi, büyüme gibi kritik gelişim evrelerinde oldukları için bu dönemde toksik maruziyet uzun vadede kalıcı hasarlara yol açabilir. Gıdaların çeşitlilik eksikliği ve özellikle bebek maması ve çocuklara özel gıdalarda kalite kontrol eksiklikleri olabiliyor.

Tablo 3’de JECFA (2002) tarafından belirlenen maksimum tolere edilebilir günlük alım miktarları verilmiştir (the provisional maximum tolerable daily intake (PMTDI)). JECFA tarafından düzenlenen risk değerlendirme standartları olan PMTDI halk sağlığını korumak üzere önerilen kronik maruziyet sınırlarıdır. Tolere edilebilir günlük alım (TDI) bir kişinin günlük olarak teorik olarak zararsız kabul edilen en yüksek maruziyet dozudur ve genellikle mikrogram/kg vücut ağırlığı/gün (µg/kg bw/gün) ile ifade edilir. Bu değerler risk değerlendirme kuruluşları tarafından belirlenir (FAO/WHO JECFA, EFSA vb.).

Tablo 4. Mikotoksinlerin Günlük Tolere Edilebilir Maksimum Dozları (TDI) (JECFA,2002)

Mikotoksin	TDI (µg/kg b.w./gün)	Notlar
Aflatoksinler	<i>Belirlenmemiş</i> (ALARA: mümkün olduğunca düşük)	Kanserojen etkiler söz konusu olduğu için kesin TDI konulmaz; mümkün olan en düşük seviyeye indirmek hedeflenir.
Ochratoxin A (OTA)	0.0002 – 0.017	Çok düşük; kanserojen risk için alt sınır
Patulin (PAT)	0.4	Sıkça meyve suyu için değerlendirilir
Deossinivalenol (DON)	1	Yaygın trichothecene
Nivalenol (NIV)	1.2	DON türevine benzer
Zearalenone (ZEA)	0.25	Hormonal etki riski vurgulanır
Fumonisinler (FUM)	2	Mısır ürünlerinde yaygındır
T-2 + HT-2 toksinleri	0.025	Tahıllarda yaygındır

Aflatoksinler için TDI belirlenmemesinin nedeni kanserojenlik ve toksik etkinin düşük dozlarda bile risk oluşturabilmesidir; bu yüzden “ALARA” (As Low As Reasonably Achievable) ilkesi uygulanır. TDI (Tolerable Daily Intake) bir kişinin günlük olarak teorik olarak zararsız kabul edilen en yüksek maruziyet dozudur, mikrogram/kg vücut ağırlığı/gün (µg/kg bw/gün) ile ifade edilir.

Mikotoksinlerin Gıda ve Yemlerde Birlikte Oluşumu

Son yıllarda ürünlerde çoklu mikotoksin çalışmalarına ilgi artmıştır ve çoklu mikotoksinlere maruziyet riski çok tartışılır olmuştur. Tek toksin üzerinden belirlenen maksimum limitler maruziyet riskleri çalışmaların sonuçlarına göre tekrar değerlendirilebilir. Avrupa ve global literatürde yapılan çok sayıda analiz, gıdalar ve yemlerde birden fazla mikotoksinin birlikte bulunduğunu göstermiştir. Şu anki kurallar yeterli değil: Mevcut yasal düzenlemeler sadece tek bir mikotoksin için sınır koyuyor. Birden fazla mikotoksinin birlikte oluşturduğu etkiler için henüz bir düzenleme yapılmamıştır. Araştırmaların çoğu tekli toksinlere odaklanmış: Literatürde mikotoksinler daha çok ayrı ayrı inceleniyor; fakat doğada genellikle birlikte bulunuyorlar (Smith ve ark., 2016).

Birlikte bulunma nedenleri:

1. Aynı mantar birden fazla mikotoksin üretebiliyor. Örneğin, *Fusarium* mantarları toprakta yaygındır ve deoksinivalenol (DON), nivalenol (NIV) ve T-2 ve HT-2 toksinleri gibi trikoteksenler ile zearalenon (ZEN) ve fumonisinler de dahil olmak üzere çeşitli toksinler üretir. Bu küflerin ve toksinlerin oluşumu çeşitli tahıl ürünlerinde meydana gelir. Farklı *fusarium* toksinleri

belirli tahıl türleriyle ilişkilidir. Genel olarak, hem DON hem de ZEN genellikle buğdayla, T-2 ve HT-2 toksinleri yulaf ile ve fumonisinler mısırla ilişkilendirilir. Trikoteksenler insanlarda akut olarak toksik olabilir, ciltte veya bağırsak mukozasında hızlı tahrişe ve ishale yol açabilir. Hayvanlarda bildirilen kronik etkiler arasında bağışıklık sisteminin baskılanması yer almaktadır. ZEN'in hormonal, östrojenik etkileri olduğu ve özellikle domuzlarda yüksek alım seviyelerinde kısırlığa neden olabileceği gösterilmiştir. Fumonisinlerin insanlarda yemek borusu kanseriyle, hayvanlarda ise karaciğer ve böbrek toksisitesiyle ilişkili olduğu bilinmektedir (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins>, erişim 25.12.2025)

2. Bir ürün aynı anda farklı mantarlar tarafından kirlenebiliyor.

3. Gıdalar ve yemler birden fazla tahıldan oluşabiliyor.

Mikotoksinlerin birlikte bulunmasının sağlık riskleri belirsiz: Mikotoksinlerin birlikte etkileri bireysel etkiler gibi tahmin edilemiyor; sinerjik (etki arttırıcı), katkısız veya azaltıcı etkiler olabilir. Bu yüzden sağlık riskleri tam olarak bilinmiyor.

Araştırmalar, %50'den fazla örnekte en az iki farklı mikotoksin tespit edildiğini bildiriyor (Palumbo ve ark., 2019). Smith ve ark. (2016) 127 mikotoksin kombinasyonu içinden en sık görülen kombinasyonlar: Aflatoksinler (AF) + Fumonisinler (FUM); Deoksinivalenol (DON) + Zearalenon (ZEA); AF + Okratoksin A (OTA); FUM + ZEA olmuştur. Coğrafi farklılıklar da kombibasyonlarda farklılıklar yaratmıştır; Afrika, Asya, Güney Amerika gibi sıcak ve nemli bölgelerde AF + FUM en yaygın, Avrupa ve Kuzey Amerika gibi ılıman/soğuk bölgelerde TCT + ZEA gibi Fusarium toksinleri daha sık, Tahıllar ana kaynak: OTA ve ZEA çoğunlukla tahıllarda bulunuyor. Mısır özellikle AF ve ZEA, arpa ise OTA için yüksek risk taşıyor. Kısaca: Mikotoksinler çoğu gıda ve yemde bir arada bulunuyor, bu birden fazla toksinin etkileri tek tek olanlardan farklı ve daha belirsiz. Mevcut düzenlemeler bu "birlikte oluşan etkileri" dikkate almıyor ve değerlendirmeler halen geliştiriliyor.

Oruç (2012) çalışmasında, Türkiye'de mikotoksinlerin tespit edilme oranını AFB1, AFM1 ve T-2 toksin, fumonisin, DON ve ZEN için sırasıyla %100, %80, %75 ve %33'bulmuştur. Yem ve yem hammaddelerinde bulunan mikotoksin miktarlarının Türkiye ve Avrupa Birliği'nde uygulanan limitlerin altında olduğu görüldü. Türkiye'de süt, yem ve yem hammaddelerinde daha önce yapılan çalışmalarda özellikle AFB1 ve AFM1 limitlerin üzerinde tespit edilmiştir. Un örneklerinin 9'unda $0,17-5,95 \pm 0,002 \mu\text{g kg}^{-1}$ arasında aflatoksin, 41'inde $0,06-70,04 \pm 0,0032 \mu\text{g kg}^{-1}$ arasında deoksinivalenol (DON) ve 15'inde $0,04-3,04 \pm 0,0018 \mu\text{g kg}^{-1}$ arasında zearalanon (ZON) miktarı tespit edilmiştir. Örneklerin tümünde deoksinivalenol ve zearalanon düzeyi TGK'nin belirlediği kabul edilebilir sınırların altında bulunmuştur. Analiz edilen örneklerden sadece bir un örneğinde [çavdar] aflatoksin B1+B2+G1+G2 düze-

yi (5,95 µg kg⁻¹) limit değerin (4 µg kg⁻¹) üzerinde saptanmıştır.

Lee ve ark. (2025) Kore’ de yaptıkları çalışmada örneklerin %4.4’ünde iki veya daha çok mikotoksin aynı anda bulunduğunu rapor etmişler, DON ve FB1 en sık görülen olmuş, belirlenen kombinasyonlarda birlikte oluşum riskine dikkat çekilmiştir

Soraia ve ark. (2024) tarafından Portekiz’de, bebekler ve küçük çocuklar tarafından tüketilen işlenmiş tahıl bazlı ürünlerdeki potansiyel mikotoksin kontaminasyonu ile ilgili yaptıkları çalışmada 20 farklı toksin (aflatoksinler, okratoksinler, trikoteksenler, zearalenonlar, fumonisinler, sitrinin ve sterigmatosistin gibi çeşitli kimyasal sınıfları kapsayan) çalışılmıştır. Analiz edilen 148 örneğin %43’ünde hedeflenen mikotoksinlerden en az biri bulunmuştur. Aflatoksin B1 (%8,1) ve fumonisin B1 (%10,8) en sık tespit edilen mikotoksinler olurken, enniatin B (%14,9) ve beauvericin (%10,1) gibi yeni ortaya çıkan mikotoksinler de yaygın olarak bulunmuştur. En sık birlikte bulunan mikotoksinler ise ENNB + BEA ve FB1 + FB2 olmuştur.

Kabak (2021) Gıdalardaki AF’lerin, Türkiye’deki görülme sıklığı ve risk değerlendirmesinde Yetişkin popülasyonunda, ortalama orta sınır (MB) maruz kalma seviyeleri AFB1 için günde 0,433 ng kg⁻¹ vücut ağırlığı ve AFT için günde 0,511 ng kg⁻¹ vücut ağırlığı olarak belirlemiştir. AFB1 ve AFT’nin %95’lik diyet yoluyla maruz kalma seviyeleri sırasıyla günde 1,19 ve 1,29 ng kg⁻¹ vücut ağırlığı olarak tahmin edilmiştir. Türk yetişkinlerinde AFB1 maruziyetine en büyük katkıyı fıstık (%44,4) sağlarken, bunu mısır/mısır unu (%16,2), yer fıstığı (%13,8), acı biber (%10,1), ceviz (%4,9), fındık (%4,0), çikolata (%3,9) ve diğerleri (%2,7) olmuş. AFB1’e ortalama ve 95. yüzdelik dilim maruziyetleri için maruziyet marjı (MOE) tahminleri 10.000’den oldukça düşük olup, bu durum Türk yetişkinleri için potansiyel bir sağlık endişesi yaratmaktadır. Çocuklarda çok daha yüksek risk yaratacaktır.

Palumbo ve ark. (2020) çalışmalarında, mikotoksinler esas olarak buğday ve mısırdaki rapor edilmiş olup, en yüksek konsantrasyonlarda fumonisinler (FB’ler), deoksinivalenol (DON), aflatoksinler (AF’ler) ve zearalenon (ZEN) bulunmuştur. FB 1 + FB 2’nin maksimum konsantrasyonları hem yem hem de gıda olarak mısırdaki rapor edilmiş ve yasal maksimum seviyelerin (ML’ler) üzerinde olmuştur. Benzer sonuçlar, buğday, arpa, mısır ve yulafta maksimum konsantrasyonları ML’leri aşan DON- çığıdasında da gözlemlenmiştir. Toplam kayıtların %54,9’unda birlikte bulunma durumu raporlanmıştır; bu da en az iki mikotoksinle birlikte kontamine oldukları anlamına gelir. Ana mikotoksinler bağlamında, mısırdaki DON’un FB’lerle ve buğdayda ZEN’in birlikte bulunması sıklıkla gözlemlenmiştir; arpa ve yulafta ise sırasıyla DON + NIV ve DON + T2/HT2 sıklıkla rapor edilmiştir. ZEN ve faz I ve faz II modifiye formlarının varlığı dışında, diğer modifiye formlar için (yani, esas olarak DON’un asetil türevleri) yalnızca sınırlı sayıda nicel veri mevcuttur. Veri

eksiklikleri, ana mikotoksinler, metabolitler ve modifiye formları için birlikte bulunma modellerini belirlemek amacıyla birden fazla mikotoksin üzerinde izleme çalışmalarına duyulan ihtiyaçla birlikte vurgulanmıştır.

Awuchi ve ark. (2022) Özellikle, çoklu mikotoksinlerin toksikolojik mekanizmalarının insan hücrel genomunu nasıl etkilediği konusundaki araştırmalarında, mikotoksin toksisitesinin ve toksikolojik mekanizmalarının önemiyle birlikte, bu toksinlere maruz kalmanın yol açtığı DNA hasarı, böbrek hasarı, DNA/RNA mutasyonları, çocuklarda büyüme geriliği, gen modifikasyonları ve bağışıklık sistemi bozukluğu gibi sağlık sorunları olabileceğini bildiriyor. Mikotoksinlerin çevresel etkilerinin altında yatan mekanizmalar hakkındaki anlayışı geliştirmek için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir; bu da mikotoksin toksisitesini kolaylaştıran koşullar/faktörler üzerine risk değerlendirme çalışmaları yoluyla gerçekleştirilebilir.

Çin’de yapılan bir çalışmada 15 farklı mikotoksin aynı anda süt sığırı yemlerinde tespit edildi. DON, ZEN, FBs, OTA, T-2, aflatoksinler örneklerde yaygın olduğu rapor edilmiştir (Zhu ve ark. 2025).

Türkiye’de Durum;

Avrupa Birliği’nin Gıda Alarm Sistemi (RASFF)’ ne takılan, 2025’te Türkiye kaynaklı kurutulmuş meyveler için arka arkaya “aflatoksin ve okratoksin” bildirimleri paylaşıldı.

1. Kuru incirde aşırı aflatoksin – Polonya bildirimi (Ref: 2025.9125)
 - * Aflatoksin B1: 31,52 µg/kg (limit: 6 µg/kg)
 - * Toplam aflatoksin: 33,01 µg/kg (limit: 10 µg/kg)
2. Salatalıkta Fosthiazate – Hollanda bildirimi (Ref: 2025.9126)
 - * Tespit: 0,10 mg/kg (limit: 0,02 mg/kg)
3. Kuru incirde aflatoksin + okratoksin – Bulgaristan bildirimi (Ref: 2025.9140)
 - * Okratoksin A: 48,3 µg/kg (limit: 8 µg/kg)
 - * Aflatoksin B1 ve total yine limit üstü
4. Fransa’dan üç ayrı kuru incir reddi (Ref: 2025.9145, 9147, 9149)
 - * Aflatoksin total: 23–48 µg/kg
 - * Okratoksin A: 72 µg/kg (limit: 8 µg/kg)
5. Almanya’dan organik incir reddi (Ref: 2025.9171)
 - * Aflatoksin total: 14,66 µg/kg
 - * Limit: 10 µg/kg

6. Almanya’da kuru dut geri çağrıldı (Ref: 2025.9191)

* Aflatoksin total: 16,5 µg/kg

Mikotoksinlerin gıda ve yemlerden yok edilmesi için henüz bir yöntem bulunamamıştır. Mikotoksinler kimyasal ve ısıtma işlemlerden etkilenmezler, çok az etkilenmiş görünse de bu azalma gizli mikotoksin formuna dönüşür (Sa ve ark., 2023).

Genel olarak, tarım ürünlerinin mikotoksin kontaminasyonu aşağıdaki yöntemlerle önlenir:

1. Hasat öncesi yöntemler:

- a. dayanıklı çeşitlerin kullanılması
- b. tarla yönetimi
- c. biyolojik ve kimyasal ajanların kullanımı
- d. hasat yönetimi

2. Hasat sonrası yöntemler:

- a. geliştirilmiş kurutma yöntemleri
- b. iyi depolama koşulları

Sonuç

Mikotoksinler dünya çapında gıda ve yemlerde sorun olduğu gibi Türkiye’de de önemli bir sorundur. Mikotoksinler, dünya genelinde çok çeşitli yem ve gıdalarda, esas olarak küf genetiği ve fizyolojisi, dış ve iç ortam ve iklim değişikliklerine bağlı olarak farklı konsantrasyonlarda bulunur. Bazı mikotoksinler sıklıkla birlikte bulunsalar da (örneğin, AF’ler+OTA, AF’ler+FUM veya DON+ZEA), sonsuz sayıda karışım bulunabilir. Bu nedenle, birleşik toksisite etkilerini tahmin etmek çok zordur. Mikotoksin karışımlarının türü ve konsantrasyonlarından etkilenmesinin yanı sıra, birleşik toksisite etkileri deneysel model tasarımına da bağlıdır: maruz kalan hücre türü, maruz kalma süresi, karışımda her bir mikotoksin için kullanılan oran, kullanılan uç noktalar ve testler ile seçilen istatistiksel model yöntemleri. Genel olarak, mikotoksin karışımlarının çoğu, insan ve hayvan sağlığı için önemli bir tehdit oluşturan katkısız veya sinerjik etkilere yol açar. Dünya genelinde gıda ve yemlerdeki mikotoksin kontaminasyonu üzerine yapılan çok sayıda çalışmayı içeren bu derleme, her kıtanın çoklu kontaminasyonlara genel bir bakış açısı edinmesini ve bunlara odaklanmasını sağlayan güçlü bir çalışma temeli oluşturmaktadır. Çeşitli yayınlar zaten önemli kombine etkiler göstermiştir, ancak ilgili mikotoksin kombinasyonları hakkında daha fazla çalışma yapılmalı ve özellikle şu ana kadar yalnızca tekli maruz kalma verilerini dikkate alan mevcut düzenlemeler tarafından dikkate alınmalıdır. Son olarak, kullanılabilir olası

metodolojik yaklaşımların (hücre modelleri, incelenen parametreler, zaman ve doz maruziyeti, matematiksel araçlar) gözlemlenen çeşitliliği, verilerin daha kolay karşılaştırılmasını sağlayacak uluslararası düzeyde yöntem standardizasyonuna duyulan ihtiyacı gündeme getirmektedir.

Mikotoksinlerin gıdalarda beraberce bulunması, yalnızca bir kontaminasyon fenomeni olmayıp çevresel, biyolojik ve beslenme kaynaklı faktörlerin çok boyutlu etkileşimi sonucu ortaya çıkan kompleks bir olgudur. Birlikte bulunma durumunun toksik etkileri, tekil toksinlere dayalı risk modelleri ile yeterince değerlendirilememekte ve bu alanda daha geniş kapsamlı toksikolojik veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, mikotoksin yasal düzenlemelerinde ve analiz protokollerinde çoklu maruziyeti dikkate alan yeni yaklaşımların geliştirilmesi gereklidir.

Mikotoksinlerden kaynaklanan sağlık riskini en aza indirmek için, özellikle çocuk beslenmesinde, insanlara şunlar tavsiye edilir:

- Özellikle mısır, sorgum, buğday, pirinç gibi aflatoksinlerle düzenli olarak kirlenen tam tahılları,

kuru incirleri ve yer fıstığı, antep fıstığı, badem, ceviz, hindistan cevizi, Brezilya fıstığı ve fındık gibi

kuruyemişleri küf belirtileri açısından inceleyin ve küflü, rengi değişmiş veya buruşmuş görünenleri atın;

- Kurutma işleminden önce, işlem sırasında ve depolama esnasında tahıllara zarar vermektan kaçının, çünkü hasarlı tahıllar küflenmeye ve dolayısıyla mikotoksin kontaminasyonuna daha yatkındır;

- Tahılları ve kuruyemişleri olabildiğince taze satın alın;

- Yiyeceklerin uygun şekilde saklandığından emin olun – böceklerden uzak, kuru ve çok sıcak olmayan bir yerde muhafaza edin;

- Yiyecekleri kullanılmadan önce uzun süre saklamamak gerekir.

- Çeşitli bir beslenme düzeni sağlayın; bu sadece mikotoksinlere maruz kalmayı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda beslenmeyi de iyileştirir.

KAYNAKLAR

- Alizadeh A M, Roshandel G, Roudbarmohammadi S, Roudbary M, Sohanaki H, Ghi-
asian SA, Taherkhani A, Semnani S, Aghasi M (2012) Fumonisin B1 Contami-
nation of Cereals and Risk of Esophageal Cancer in a High Risk Area in Nort-
heastern Iran. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 13, (6) 2625-2628.
<https://doi.org/10.7314/APJCP.2012.13.6.2625>
- Andrade G C.R.M, Pimpinato RF, Francisco JG, Monteiro SH, Calori- Domingues
MA, Tornisielo VL (2018) Evaluation of mycotoxins and their estimated daily
intake in popcorn **and cornflakes** using LC-MS techniques. *Lebensm. Wiss.*
Technol. 95, 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.073>
- Awuchi, C. G., Ondari, E. N., Nwozo, S., Odongo, G. A., Eseoghene, I. J., Twino-
muhwezi, H., Ogbonna, C. U., Upadhyay, A. K., Adeleye, A. O., & Okpala, C.
O. R. (2022). Mycotoxins' Toxicological Mechanisms Involving Humans, Li-
vestock and Their Associated Health Concerns: A Review. *Toxins*, 14(3), 167.
<https://doi.org/10.3390/toxins14030167>.
- Bullerman, L.B.; Bianchini, A. Stability of mycotoxins during food processing. *Int. J.*
Food Microbiol. 2007, 119, 140–146.
- Cabrera-Meraz J, Maldonado L, Bianchini A & Espinal R (2021) Incidence of afla-
toxins and fumonisins in grain, masa and corn tortillas in four municipalities
in the department of Lempira, Honduras. *Heliyon*, 7(12), Article e08506. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08506>
- Chen C, Mitchell NJ, Gratz J, Houpt ER, Gong Y, Egner PA, Wu F (2018) Exposure to
aflatoxin and fumonisin in children at risk for growth impairment in rural Tan-
zania. *Environ Int* 115:29–37. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.001>
- EC, (European Commission). Directive 2002/32/EC of the European Parliament and
of the Council of 7 May 2002 (consolidated version 2013-12-27) on undesirable
substances in animal feed. Available online: [http://eur-lex.europa.eu/legal-con-
tent/EN/TXT/?uri=CELEX:02002L0032-20131227](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02002L0032-20131227) (accessed on 30 November
2015).
- Ekwomadu TI, Gopane RE, Mwanza M (2018) Occurrence of filamentous fungi in
maize destined for human consumption in South Africa. *Food Sci. Nutr.* 6,
884–890. <https://doi.org/10.1002/fsn3.561>
- Eskola, M., Kos, G., Elliott, C. T., Hajšlová, J., Mayar, S., & Krska, R. (2020). Worldwi-
de contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited
'FAO estimate' of 25%. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(16),
2773–2789. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>
- FDA (U.S. Food and Drug Administration) Guidance for industry and FDA: Advi-
sory levels for deoxynivalenol (DON) in finished wheat products for human
consumption and grains and grain by-products used for animal feed (June 29
2010; Revised July 7, 2010) Available online: [http://www.fda.gov/downloads/
Food/GuidanceRegulation/UCM217558.pdf](http://www.fda.gov/downloads/Food/GuidanceRegulation/UCM217558.pdf) Accessed on December 3, 2015.

- Gelderblom WCA, Jaskiewicz K, Marasas WFO, Thiel P G, Horak MJ, Vleggaar R and Kriek NPJ (1988) Fumonisin—novel mycotoxins with cancer-promoting activity produced by *Fusarium moniliforme*. *Appl. Environ Microbiol.* 54:1806-1811. Crossref. PubMed. <https://doi.org/10.1128/aem.54.7.1806-1811>
- Gelderblom, W.C.A., Marasas W.F.O., Lebepe-Mazur, S., Swanevelde, S., Abel, S. (2008). Cancer initiating properties of fumonisin B1 in a short-term rat liver carcinogenesis assay. *Toxicology* 250, 89-95. doi:10.1016/j.tox.2008.06.004
- Gökışık, C.D., Kahtalı, M. (2023). Determination of fumonisins exposure in children and youth consuming corn-based products in Giresun, Turkey, *Journal of Food Composition and Analysis*, 123, 105566, ISSN 0889-1575, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105566>
- IARC, (2002). International Agency for Research on Cancer (IARC). Some Traditional Herbal Medicines, Some Mycotoxins, Naphthalene and Styrene; IARC: Lyon, France, 2002; Volume 82, ISBN 9789283215875
- IARC (2012). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: chemical agents and related occupations. A review of human carcinogens, 100F (2012), pp. 224-248
- Jestoi, M. (2008). Emerging *Fusarium* -Mycotoxins Fusaproliferin, Beauvericin, Enniatins, And Moniliformin—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(1), 21–49. <https://doi.org/10.1080/10408390601062021>
- Kabak, B., & Dobson, A. D. W. (2017). Mycotoxins in spices and herbs—An update. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(1), 18–34. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772891>
- Kabak, B. (2021). Aflatoxins in foodstuffs: Occurrence and risk assessment in Turkey, *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103734, 0889-1575, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103734>.
- Lee SY, Woo SY, Park SB, Zheng Y, Chun HS. (2025). Multi-mycotoxin occurrence and risk assessment in Korean foods by validated liquid chromatography-tandem mass spectrometry detection with solid-phase extraction cleanup. *Food Res Int.*, 221(Pt 3):117500. doi: 10.1016/j.foodres.2025.117500. Epub 2025 Sep 15.
- Marasas, W.F.O.; Riley, R.T.; Hendricks, K.A.; Stevens, V.L.; Sadler, T.W.; Waes, J.G.; Missmer, S.A.; Cabrera, J.; Torres, O.; Gelderblom, W.C.A.; et al. (2004). Fumonisin disrupts sphingolipid metabolism, folate transport, and neural tube development in embryo culture and in vivo: A potential risk factor for human neural tube defects among populations consuming fumonisin-contaminated maize. *J. Nutr.* 134, 711–716.
- Missmer, S.; Hendricks, K.; Suarez, L.; Larsen, R.; Rothman, I. Fumonisin and neural tube defects. *Epidemiology* 2000, 11, 183–184.
- Oruç, H. H. vd. (2012). “Determination of various mycotoxin concentrations in the feedstuffs and feed produced by a feed manufacturer in Turkey”. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 18(4), 633-638.

- Palumbo, R., Crisci, A., Venâncio, A., Cortiñas Abrahantes, J., Dorne, J.-L., Battilani, P., & Toscano, P. (2020). Occurrence and Co-Occurrence of Mycotoxins in Cereal-Based Feed and Food. *Microorganisms*, 8(1), 74. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8010074>.
- Reinhold A, Gessner AL, Scherlach K, W, N S, Borkowetz A, Mothes AR, Hertweck C, Mothes H (2024) Maize Flour Processing Determines the Fumonisin Intake of South Malawi Residents, *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024, 8785591, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/jfpp/8785591>
- Sá SVd, Monteiro C, Fernandes JO, Pinto E, Faria MA, Cunha SC (2023) Emerging mycotoxins in infant and children foods: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1967282>
- Song, X, Yue Song, Junjie Gu, Mei Zhang, Lei Zhang, Xiaonan Zheng, Lin Guo & Xiaoting Liu (2025) Fumonisin in maize and its products from Dalian region, China, and risk assessment by deterministic and probabilistic approaches, *Food Additives & Contaminants: Part B*, 18:2, 120-126, DOI: 10.1080/19393210.2024.2446799
- Soraia, Sá SVd, Monteiro CS, Fernandes JO, Pinto E, Faria MA, Cunha SC (2024) Evaluating the human neurotoxicity and toxicological interactions impact of co-occurring regulated and emerging mycotoxins. *Food Res Int* 184:114239. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114239>
- Shephard, Gordon S Pieter G Thiel, Sonja Stockenström, Eric W Sydenham. 2020. Worldwide Survey of Fumonisin Contamination of Corn and Corn-Based Products, *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 79, 3, 1 May 1996, Pages 671–687. <https://doi.org/10.1093/jaoac/79.3.671>
- 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(4), 94. <https://doi.org/10.3390/toxins8040094>.
- Soraia VM de Sá, Fernandes JO, Faria MA & Sara C Cunha (2025) Assessment of Mycotoxins in Infants and Children Cereal-Based Foods: Dietary Exposure and Potential Health Risks. *Expo Health* 17, 425–444. <https://doi.org/10.1007/s12403-024-00668-y>
- Stoev, S. D. (2023). Foodborne Diseases Due to Underestimated Hazard of Joint Mycotoxin Exposure at Low Levels and Possible Risk Assessment. *Toxins*, 15(7), 464. <https://doi.org/10.3390/toxins15070464>
- Stoev, S. D. (2024). Food Security and Foodborne Mycotoxicoses—What Should Be the Adequate Risk Assessment and Regulation? *Microorganisms*, 12(3), 580. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030580>
- EC, (2023). The European Commission. Regulation No. 2023/915 of 25 April 2023 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs and repealing Regulation (EC) No. 1881/2006 of 19 December 2006. *Off. J. Eur. Union* 2023, 119, 103–157.
- Ullah, S., Shakir, L., Ali, S., Subhan, G., Sohail, M., Khan, I. and Ali, S., 2025. Nutritio-

nal analysis, phytochemical and antifungal study of *Equisetum arvense* L. from Village Kharkay, PakAfghan border, District Dir Lower. Kashmir J. Sci., 4(1). <https://doi.org/10.63147/krjs.v4i01.85>

- WHO (2018) Food safety collaborative platform. [https:// apps. who. int/fosco llab/ Dashb oard/ FoodC onso](https://apps.who.int/fosco/llab/Dashboard/FoodConso)
- WHO. 2011. Safety Evaluation of Certain Contaminants in Food: Prepared by the Seventy-Second Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA); WHO Food Additives Series, No. 63; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2011.
- WHO. 2008. Safety Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants: Prepared by the Sixty-Eighth Meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA); WHO Food Additives Series, No. 59; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2008. [Google Scholar]
- Yang X, Gao J, Liu Q, Yang D (2019) Co-occurrence of mycotoxins in maize and maize-derived food in China and estimation of dietary intake. Food Addit Contams. 12(2):124–134. <https://doi.org/10.1080/19393210.2019.1570976>
- Yli-Mattila T, Sundheim L (2022) Fumonisin in African Countries. Toxins, 14, 419. <https://doi.org/10.3390/toxins14060419>
- Zhu, Z., Cheng, H., Wang, J., Ma, J., Wang, J., Wang, H., Zhou, X., & Yang, J. (2025). Occurrence of Co-Contamination and Interaction of Multi-Mycotoxins in Dairy Cow Feed in China. Toxins, 17(3), 137. <https://doi.org/10.3390/toxins17030137>



SÜRDÜRÜLEBİLİR L SÜT ÜRÜNLERİ YAKLAŞIMI: HİBRİT YOĞURTLAR

“ ”

Senem TÜFEKÇİ¹

¹ Dr. Pamukkale Üniversitesi, Acıpayam Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü
stufekci@pau.edu.tr - 0000-0002-4613-2418

GİRİŞ

Sürdürülebilirlik kavramı, ilk kez 1987’de Birleşmiş Milletler Brundtland Komisyonu raporunda; gelecek kuşakların kendi gereksinimlerini karşılama kapasitesini riske atmadan, günümüzün ihtiyaçlarının karşılanması şeklinde tanımlanmıştır (Duru, 2025). Dünya nüfusunun artışına paralel olarak tüketimin de giderek yükselmesi, doğal kaynakların daha etkin ve verimli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle başlangıçta daha çok üretim odaklı ele alınan sürdürülebilirlik kavramı, günümüzde hem üretim hem de tüketim süreçlerini yönlendiren temel bir ölçüt haline dönüşmektedir (Bulut ve ark., 2019).

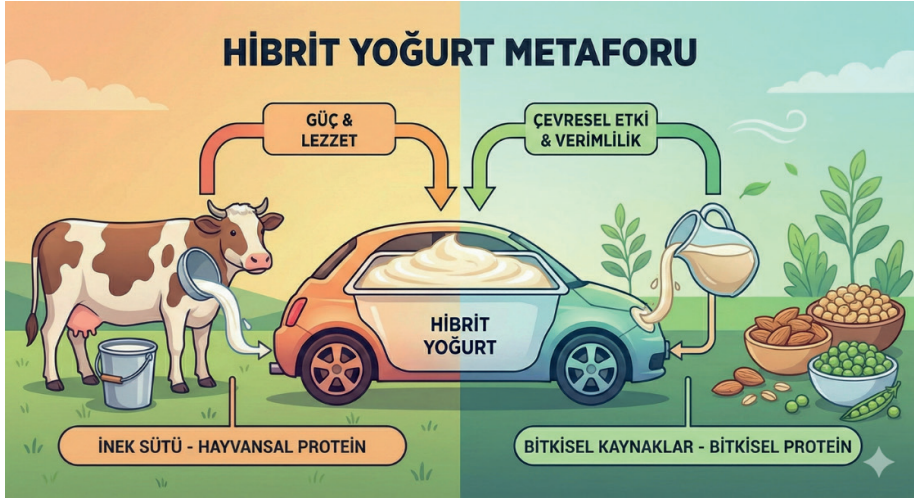
Gıda sistemlerinde sürdürülebilirlik; tarladan sofraya uzanan tüm süreçlerde doğal kaynakların kullanımını toplumun beslenme gereksinimlerini karşılayacak biçimde yönetirken gelecek nesillerin haklarını da korumayı temel alır. Bu yaklaşım doğal kaynakları koruyup verimli kullanarak gıda kaybı-israfını azaltan, gıda güvenliği ve güvencesini güçlendiren, beslenme ve sosyal refahı destekleyen ve sorumlu üretim-tüketimle çevresel koruma, ekonomik verimlilik ve sosyal adaleti birlikte hedefler (Güneş & Karakaş, 2022; Tümenbatur, 2022).

Sürdürülebilir gıda seçeneklerine yönelik artan küresel talep, hayvansal ve bitkisel kaynaklı proteinleri bir araya getiren hibrit ürünleri; çevresel kaygılar ile tüketici tercihleri arasında denge kurmaya yönelik yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Hibrit gıda seçeneklerinin geniş yelpazesi içinde yoğurt, dünya genelindeki yaygın tüketimi nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir (Méndez Méndez-Galarraga ve ark., 2025a). Bu doğrultuda hazırlanan kitap bölümünde; sürdürülebilir gıda sistemlerinin bir parçası olarak hibrit yoğurtların üretim teknolojileri, formülasyon stratejileri ve kalite parametreleri güncel literatür ışığında kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

HİBRİT YOĞURT KAVRAMI

Hibrit yoğurt kavramı, genellikle süt olmak üzere hayvansal protein kaynaklarının, bitkisel proteinler veya bileşenler ile kısmen yer değiştirilmesi ile elde edilen matrislerin fermentasyonu sonucu elde edilen ürünlerdir. Bu ürünler, tamamı bitkisel bazlı vegan yoğurt alternatifleri ile geleneksel süt ürünleri arasında bir köprü görevi görecektir şekilde tasarlanmıştır (de Brito ve ark., 2026; Martinussi e ark, 2024)

Benzinli ve elektrikli motoru birlikte kullanan hibrit bir otomobil; hibrit yoğurdu anlatacak en uygun metafordur. Benzinli motorun sağladığı tanıdık güç ve sürüş hissi hayvansal proteini temsil ederken, çevresel etkiyi azaltan ve daha sürdürülebilir ve çağdaş bir verimlilik sunan elektrik motoru bitkisel protein kaynaklarını temsil etmektedir (Şekil 1).

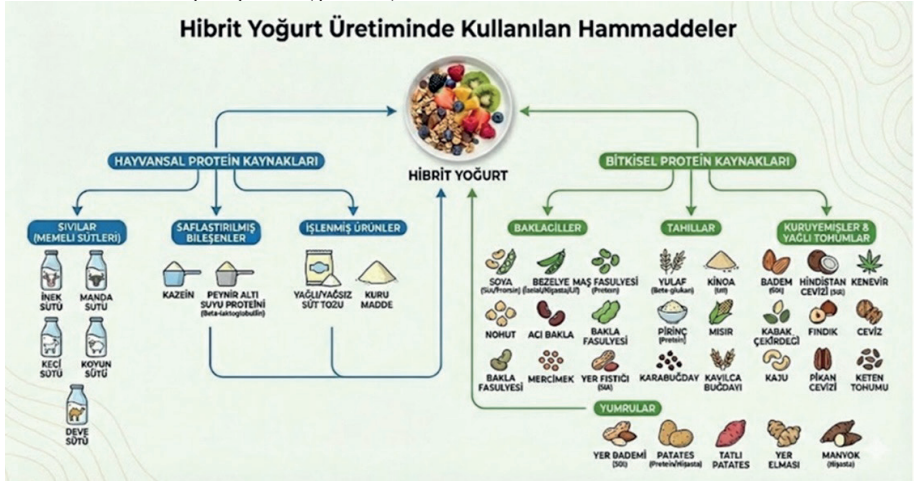


Şekil 1. Hibrit Yoğurt Metaforu: Hayvansal ve Bitkisel Kaynakların Sinerjisi. *

*Bu görsel, yazar tarafından tasarlanarak bir üretken yapay zeka aracı (Google Gemini AI Nano Banana Pro) kullanılarak oluşturulmuştur.

HİBRİT YOĞURT MATRİSİNDE HAMMADDELER

Hibrit yoğurt üretiminde hammaddeler bitkisel ve hayvansal kaynaklar olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 2).



Şekil 2. Hibrit Yoğurt Üretiminde Kullanılan Hammadde Kaynakları. *

*Bu görsel, yazar tarafından tasarlanarak bir üretken yapay zeka aracı (Google Gemini AI Nano Banana Pro) kullanılarak oluşturulmuştur.

Hayvansal Kaynaklar

Hibrit yoğurt formülasyonları, yalnızca dünya süt üretiminin yaklaşık %83'ünü oluşturan ve temel matris olarak kabul edilen inek sütü ile sınırlı kalmayıp, farklı memeli türlerinin sütlerinin harmanlanmasıyla zenginleştirilmektedir. Bu karışımlarda; inek sütüne kıyasla daha yüksek protein, yağ ve kalsiyum içeriğine sahip manda sütü, düşük alerjen potansiyeli ve sindirim kolaylığı sağlayan keçi sütü, yüksek protein ve yağ oranıyla pıhtı sertliğini artıran koyun sütü ve yüksek C vitamini ile antimikrobiyal ajanlar içeren deve sütü gibi çeşitli kaynaklar kullanılmaktadır (Boukria ve ark., 2020).

Sıvı formdaki süt kaynaklarına ek olarak, yoğurt pıhtısının temel iskeletini oluşturan kazeinler ve su tutma kapasitesini artırarak jel yapısını güçlendiren, özellikle beta-laktoglobulin içeren peynir altı suyu proteinleri gibi saflaştırılmış bileşenler de formülasyonlara dahil edilmektedir (Méndez-Galarraga, Curutchet ve Rodríguez Arzuaga, 2025). Ayrıca, karışımın kuru maddesini ayarlamak ve fizikokimyasal yapıyı standardize etmek amacıyla yağlı/yağsız süt tozu gibi işlenmiş süt ürünleri de formülasyonlarda sıklıkla yer almaktadır (Hassan ve ark., 2025).

Hayvansal kaynaklı bu proteinler, bitkisel proteinlerin düşük çözünürlük veya zayıf jelleşme gibi teknolojik sınırlamalarını dengelemekte ve bitkisel kaynaklarda eksik olan esansiyel amino asitleri sağlayarak ürünün biyolojik değerini tamamlamaktadır (Méndez-Galarraga ve ark., 2025a).

Bitkisel Kaynaklar

Hibrit yoğurt üretiminde kullanılan bitkisel protein kaynakları oldukça çeşitlidir ve genellikle dört ana botanik sınıfa ayrılmaktadır: baklagiller, tahıllar, kuruyemişler/yağlı tohumlar ve yumrular. Bu kaynaklar, yoğurdun hem besin profilini zenginleştirmek hem de sürdürülebilir bir alternatif sunmak amacıyla süt proteinleriyle birleştirilir (Hu, Liu, Wang, Yang ve Shao, 2022; Méndez Méndez-Galarraga ve ark., 2025a; Pua vd., 2022).

Baklagiller, yüksek protein içerikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle hibrit sistemlerde en çok tercih edilen sınıftır (Méndez-Galarraga ve ark., 2025a). Soya; en yaygın kullanılan bitkisel kaynaktır ve sıklıkla kazein veya peynir altı suyu proteinleriyle karıştırılarak fermente edilir. Soya sütü, yoğurt benzeri ürünlerde inek sütüyle birlikte kullanıldığında asitliği artırabilir ve fermentasyon süresini kısaltabilir (Hu ve ark., 2022; Pua ve ark., 2022). Bezelye protein izolatı, nişastası ve lifi; yoğurdun su tutma kapasitesini ve sertliğini artırmak için kullanılır; özellikle keçi sütü yoğurunda bezelye nişastası ve rüşeym tozunun jel sertliğini artırma potansiyeli olduğu bildirilmiştir (Qin ve ark., 2025). Maş fasulyesi proteini ise sodyum kazeinat ile birleştirildiğinde sinerjik bir etki yaratarak daha sıkı ve ince gözenekli bir ağ yapısı oluşturur (Ran ve ark., 2024). Nohut, acı bakla, bakla fasulyesi, mercimek ve yer fıstığı

da protein dengesini optimize etmek için hibrit formüllere dahil edilen diğer baklagillerdir (Hu vd., 2022; Pua ve ark., 2022). Yer fıstığı sütü ve inek sütü karışımları, uygun stabilizatörlerle zengin bir aroma ve doku sağlar (Hu ve ark., 2022).

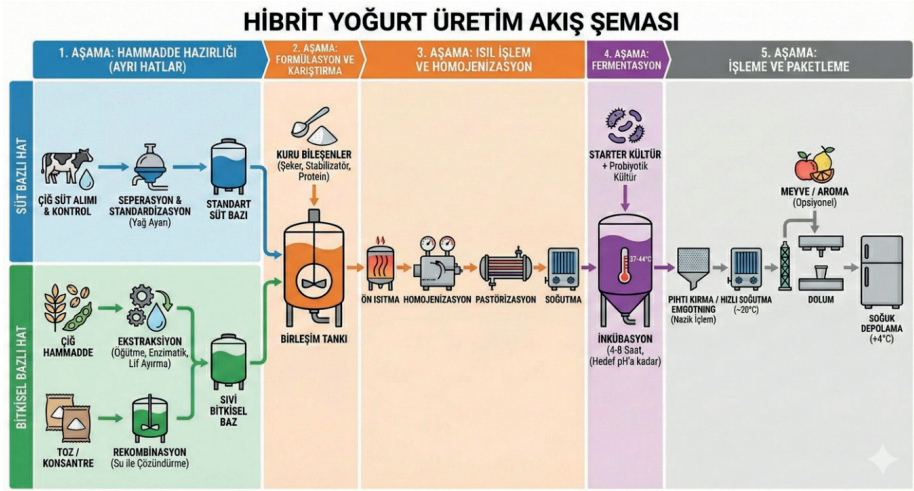
Tahıllar, yoğurda sadece protein değil, aynı zamanda diyet lifi kazandırır ve antioksidan kapasiteyi artırır (Pua ve ark., 2022). Yulaf; içerdiği beta-glukanlar sayesinde fonksiyonel fayda sağlar. Uygun starter kültür seçimi ürünün stabilitesini ve dokusunu iyileştirir (Ziarno ve ark., 2025). Ayrıca yulaf proteini, fermente süt ürünlerinde daha narin bir doku ve belirgin bir lezzet sunmaktadır. Kinoa, tüm temel amino asitleri içeren bir “yalancı tahıl” olarak besinsel değeri artırırken, pirinç proteini hipoalerjenik özellikleri nedeniyle tercih edilir. Kinoa unu eklenen yoğurtlarda viskozitenin ve su tutma kapasitesinin arttığı, ayrıca yeni aroma bileşenlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir (Hu ve ark., 2022). Mısır, arpa, karabuğday kavalca buğdayı genellikle dokusal çeşitlilik ve farklı aroma profilleri sağlamak için sisteme eklenir; örneğin mısır ve soya peptidleri kombinasyonu yoğurdun kalitesini artırmak için kullanılmaktadır (Hu ve ark., 2022; Pua ve ark., 2022).

Kuruyemişler ve yağlı tohumlar, yüksek yağ içerikleri sayesinde yoğurdun ağızda bıraktığı kremi hissi ve lezzeti geliştirir (Pua ve ark., 2022). Badem ve hindistan cevizi doğal kremi dokuları nedeniyle hayvansal sütle en uyumlu bitkisel kaynaklar arasındadır. Hindistan cevizi sütü, peynir altı suyu proteini ile karıştırıldığında yüksek kaliteli yoğurtlar elde edilebilir (Hu ve ark., 2022; Pua ve ark., 2022). Kenevir, kanola ve kabak çekirdeği; dengeli amino asit profilleriyle dikkat çeker ve ürüne ilave fonksiyonel özellikler sağlar (Méndez-Galarraga ve ark., 2025a). Fındık, ceviz, kaju, pıkan cevizi ve keten tohumu, yoğurdun viskozitesini ve antioksidan kapasitesini artırmak için kullanılır (Hu ve ark., 2022).

Yumurta bitkiler hibrit yoğurtlarda tekstür düzenleyici olarak rol oynar. Yer bademi, yüksek lif ve protein içeriğiyle besleyici bir temel oluşturur; sütü geleneksel bir içecek olup yoğurt benzeri ürünlere dönüştürülebilir. Patates, tatlı patates, yer elması ve manyok; nişasta bazlı yapılandırma sağlamak veya düşük maliyetli besin kaynağı olarak formüllere eklenir. Patates proteini, emülsiyon stabilitesi sağlayarak jelleşme özelliklerini iyileştirebilir (Pua ve ark., 2022).

HİBRİT YOĞURT ÜRETİMİ

Hibrit yoğurt üretimi, hayvansal ve bitkisel bazlı hammaddelerin farklı fizikokimyasal davranışlarını ortak bir altyapıda yönetebilen, esnek ve entegre bir hat tasarımı gerektirmektedir. Gerektirir (Şekil 3).



Şekil 3. Entegre Hibrit Fermente Ürün (Yoğurt) İşleme Hattı Diyagramı*

*Bu görsel, yazar tarafından tasarlanarak bir üretken yapay zeka aracı (Google Gemini AI Nano Banana Pro) kullanılarak oluşturulmuştur.

Sürecin başlangıç aşaması olan hammadde hazırlığı, kullanılan kaynağa göre farklılaşmakla birlikte; hayvansal süt bazlı üretimde süreç, sütün yağ oranının ayarlandığı standardizasyon işlemiyle başlarken; bitkisel tarafta yulaf veya soya gibi hammaddelerin sıvı faza dönüştürüldüğü bir “ekstraksiyon” (öğütme, enzimatik parçalama ve ayırıştırma) adımı gereklidir. Ancak bitkisel baz, tesis dışından konsantre veya toz formunda tedarik edilirse bu adım atlanarak doğrudan formülasyona geçilebilmektedir. Formülasyon ve Karıştırma aşaması, hibrit hattın “en zorlu koşula göre tasarım” ilkesinin uygulandığı noktadır. Bitkisel proteinlerin ve stabilizatörlerin çözünürlük gereksinimleri süt tozuna kıyasla daha zorlu olduğundan, karıştırma tanklarında genellikle ısıtma opsiyonlu ve yüksek kesmeli (high-shear) mikserler tercih edilmelidir. Bu donanım seçimi, bitkisel bileşenlerin tam hidrasyonunu sağlarken süt bazlı karışımlar için de yeterli performansı sunmaktadır. Karışımın mikrobiyolojik güvenliğini ve dokusal altyapısını sağlayan ısıl İşlem ve homojenizasyon adımlarında, bitkisel hammaddelerden gelebilecek lif ve partiküllerin plakalı sistemlerde tıkanma yaratma riski göz önüne alınarak genellikle tübüler ısı değiştiriciler kullanılır. Fermantasyon sıcaklığına soğutulan baz, fermantasyon tankına alınır ve inokülasyon gerçekleştirilir. Fermantasyon sonunda (hedef pH’a kadar 4 ile 8 saat) oluşan pıhtı, özellikle mekanik etkilere karşı oldukça hassastır ve bu nedenle iletim hattı jeli parçalamayacak nazık bir transfer sağlayacak şekilde tasarlanır. Ürün, pürüzsüz ve parlak bir yapı kazanması için Pürüzsüzleştirme (smoothing) işleminden geçirilir ve fermantasyonu durdurmak amacıyla soğutulur. Son adımda ürün viskozitesine

uygun dolum makineleri ile paketlenerek soğuk zincire dahil edilir. Tüm bu hibrit akışta, üretimler arası geçişlerde çapraz bulaşmayı önlemek adına gelişmiş bir Alerjen Yönetimi ve CIP (Yerinde Temizlik) protokolü uygulanması, gıda güvenliği açısından zorunluluktur (Tetra Pak, 2023).

HİBRİT YOĞURT ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Hibrit yoğurt üretimine ilişkin literatürde yer alan çalışmalar; kullanılan hayvansal/bitkisel protein kaynakları ve karışım oranları, fermentasyon koşulları ve elde edilen temel bulgular açısından karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de özetlenmiştir.

Hibrit yoğurtlarda bitkisel protein kaynağının türü ve ikame/ilave oranı, fermentasyon kinetiğinden doku oluşumuna, besin profilinden duysal kabule kadar ürün performansını çok boyutlu biçimde belirlemektedir. Fermentasyon açısından bakıldığında, bitkisel fraksiyonun bileşimi asitlik gelişimini doğrudan yönlendirmektedir. Örneğin soya proteini laktik asit bakterileri için kullanılabilir nitrojen sağlayıp ve tamponlama kapasitesini azaltarak fermentasyonu hızlandırırken, pirinç proteini, yulaf ya da yüksek oranda badem sütü ilavesi pH düşüşünü zorlaştırarak süreci yavaşlatabilmektedir. Buna rağmen hibrit matrislerin yoğurt starter kültürleri ve probiyotikler için genel olarak elverişli bir ortam sunduğu bildirilmektedir.

Doku ve yapı bakımından, hibrit ürünlerin temel sınırlılığı bitkisel proteinlerin, kazein benzeri güçlü ve sürekli bir jel ağı oluşturmada zorlanması olarak tespit edilmiştir. Bezelye, pirinç ve yulaf proteinlerinin kazein ağı içinde “inaktif dolgu maddesi” gibi davranarak ağ sürekliliğini bozduğu; bitkisel ikame oranı arttıkça viskozite ve pıhtı sertliğinin azaldığı literatürdeki çalışmalarda sıkça yer alan bulgulardır. Bu yapısal zayıflık serum ayrılmasını da artırabilmekte, ancak pektin gibi dengeleyiciler veya düşük pompa hızı/vakum altında çalışma gibi teknolojik düzenlemelerle azaltılabilmektedir. Çalışmaların çoğu, geleneksel yoğurt dokusuna en yakın stabilitenin yakalanabilmesi için %25 bitkisel ikame oranını kritik bir eşik olarak işaret etmektedir.

Tablo 1. Hibrit Yoğurt Matrislerinde Bitkisel İkame Oranının Fermentasyon Kinetiği ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi

Kaynak	Hayvansal (H)	Protein kaynağı Bitkisel (B)	Oran (H:B)	Fermentasyon Koşulları	Önemli Bulgular
Al Noman ve ark. (2025)	İnek sütü	Soya ve yulaf sütü	90:10, 70:30, 50:50	%0,4 yoğurt starter kültürü (YSK) ilavesi (<i>Streptococcus thermophilus</i> ve <i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>bulgaricus</i>) 40 °C / 15 saat Fermentasyon sonu(FS) pH = 4,5	• Bitkisel süt oranı arttıkça, ürün viskozite azalmıştır. • Hibrit yoğurtlarda pH düşüşü daha hızlı gerçekleşmiştir. • pH: Soya sütü oranı arttıkça yükselip, yulaf sütü oranı arttığında düşmüştür. • En yüksek soya ikamesine sahip olan (50:50) ürün duyusal olarak en yüksek kabul edilirlık değerine (7,16/10) ulaşmıştır • 70:30 oranında yulaf ikameli ürün 'tam karamida ölçğinde daha olumlu sonuçlar (6,86/10) almıştır. • Koliformlar, <i>Staphylococcus</i> ve <i>E.coli</i> gibi potansiyel olarak tehlikeli mikroorganizmalar tespit edilememiş ve tüm hibrit ürünlerin tüketim için güvenli olduğu mikrobiral analizler doğrulanmıştır.
					• Soya konsantrasyonundaki artış gözlemleri büyütüp hayvansal yoğurda göre yapıyı gevşetmiştir. • Hibrit ürünlerde sadece %25 soya ilavesi homojen ve sıkı bir jel matrisi sağlanabilmiş ve ideal doku oluşturmuştur. • Soya proteininin oluşturduğu ağ yapısının su tutma yeteneğinin kazeine göre daha zayıf olduğu belirlenmiştir. • Soya sütünün %50, %75 ve %100 oranlarında eklendiği yoğurtlarda, "fasulye/otsu" kokuya neden olan heksanal maddesi tespit edilmiştir. %25'lik karışımında ise bu istenmeyen koku maskelenmiş ve daha dengeli bir aroma profili elde edilmiştir. • %25 soya sütü içeren hibrit yoğurt, mide sindirimi simülasyonunda kazein ve soya proteinlerinden açığa çıkan biyoaktif peptitlerin sinerjik etkisi sayesinde en yüksek ACE inhibitör (tansiyon düşürücü) aktiviteyi göstermiştir.
					• SPI ilavesi, laktik asit bakterileri için mevcut nitrojen kaynaklarını artırıp tamponlama kapasitesini düşürerek fermentasyon süresini kısaltmıştır. • RPI ise fermentasyon sürecini yavaşlatmıştır. • Soya jelleri gözenekli ve dallanmış bir matris sunarken, pirinç jelleri zayıf etkileşimlerden kaynaklanan kopuk ve gevşek bir yapı göstermiştir. • WPC yerine RPI kullanıldığında, oluışan ağ yapısı suyu tutamamış ve yüksek oranda serum ayrılması gerçekleşmiştir. • SPI jelleri ise suyu tutmada pirince göre daha iyi sonuç vermiştir. • 1:1 oranında SMP ve SPI içeren hibrit yoğurt, %100 hayvansal protein içeren kontrole en yakın sertlik ve yapışkanlık değerleri göstermiştir.
Méndez- Galaraga ve ark. (2023b)	Yağsız süt tozu (SMP) ve Peynir altı suyu konsantresi (WPC)	Soya proteini izolatı (SPI) ve pirinç proteini izolatı (RPI)	2:0, 1:1, 2:1:1	%0,02 YSK ilavesi 43 °C / 3,5-5 saat FS pH = 4,5	

Tablo 1. Hibrit Yoğurt Matrislerinde Bitkisel İkame Oranının Fermentasyon Kinetiği ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi (devam)

Kaynak	Hayvansal (H)	Protein kaynağı	Oran (H:B)	Fermentasyon Koşulları	Önemli Bulgular
Logan ve ark. (2025)	Yağsız süt tozu	Sarı bezelye proteinini izolatu	2:1	0,2 gr probiyotik kültür / gram protein (<i>Lactobacillus delbrueckii</i> , <i>Streptococcus thermophilus</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> ve <i>Bifidobacterium</i>) 43 °C FS pH = 4,6-4,5	%6 ve üzeri protein içeren hibrit yoğurtlar, aynı protein oranındaki hayvansal süt yoğurtlarına göre daha düşük viskoziteye sahiptir. - SEM görüntüleri ve fizikokimyasal veriler, bezelye proteinin, yağsız süt proteinini ağı içinde inaktif dolgu maddesi gibi davrandığını; bunun da daha zayıf ve daha az yapılandırılmış jellerin oluşumuna yol açtığını göstermiştir. - Hibrit yoğurtlar, hayvansal süt kontrol grubuna göre daha az topaklı olmuştur, daha yüksek oranda tebeşirimsi/kuru bir ağız hissine neden olmuştur. - Üretilen hibrit yoğurtlar, yumuşa gıplığı çeken hastalar için tanımlanan uluslararası standartlara (IDDSI Seviye 2, 3 ve 4) uygun kıvam özelliklerini göstermiş ve yüksek proteinli bir beslenme alternatifi sunmuştur. - Süt proteinini ikame oran arttıkça, pH'n 4,6'ya düşmesi zorlaşmış ve fermentasyon süresi uzamıştır. - En düşük bitkisel ikame içeren numunelerde viskozite en yüksek (516,67 cP) düzeydeyken, %74 ikame oranında viskozite 47,33 cP'ye kadar düşmüş olup bu azalma, pıhtılaşma ve jel oluşumu için ortamda daha az süt proteinini (kazein) bulunmasına bağlıdır. - Süt proteinlerinin bitkisel proteinlerle yer değiştirmesi, jelin sertliğini ve yapışkanlığını azaltırken, serum ayrılmasını artırmıştır. - Tüketicilerin %64'ü hibrit ürünleri kabul edilebilir bulmuştur. Bitkisel proteinlerin yarattığı tortulu yapı ve düşük viskozite ile bitkisel tat, en düşük puan alan duyusal özellikler olmuştur. Ancak yeşil elma aroması ilavesi, bu olumsuzlukları maskeleyerek satın alma niyetini %30'dan %49'a kadar çıkarmıştır.
Martinussi ve ark. (2024)	Yağsız UHT süt ve tam yağlı sütozu	Badem ve balıkağı çekirdeği protein konsantreleri	76:24, 67:33, 50:50, 33:67, 24:76	%2,5 YSK ilavesi 45 °C FS pH = 4,6±0,05	- Bezelye proteinini %25 ve %50 ikamede fermentasyonu olumsuz etkilememiş, tüm örneklerde bakteri canlılığı yeterli kalmıştır. %25 bezelye proteinini ikamesiyle elde edilen hibrit yoğurt, su tuma kapasitesi, serum ayrılması ve sertlik bakımından kontrol yoğurda benzer bulunmuştur. %50 ikame, kazein ağ yapısını bozmuş; bezelye proteinini ağı iyi entegre olamamış, su tuma azalırken serum ayrılması belirlenmiş şekilde artmıştır. - Bitkisel protein oran arttıkça kıvam azalmış, ancak %50 hibrit grupta, su kaybına bağlı katı madde artışı nedeniyle sertlik kontrol grubundan yüksek çıkmıştır. - Bezelye proteininin tamponlama kapasitesi kazein misellerine göre daha düşük olduğundan, %50 bitkisel ikameli yoğurtlarda pH kontrol grubuna göre daha fazla düşmüştür.
Silva ve ark. (2024)	Yağsız UHT süt ve kalsiyum kazeinat	Bezelye protein konsantrisi	100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100	%2,5 YSK ilavesi 45 °C FS pH = 4,8±0,05	- Bezelye proteinini %25 ve %50 ikamede fermentasyonu olumsuz etkilememiş, tüm örneklerde bakteri canlılığı yeterli kalmıştır. %25 bezelye proteinini ikamesiyle elde edilen hibrit yoğurt, su tuma kapasitesi, serum ayrılması ve sertlik bakımından kontrol yoğurda benzer bulunmuştur. %50 ikame, kazein ağ yapısını bozmuş; bezelye proteinini ağı iyi entegre olamamış, su tuma azalırken serum ayrılması belirlenmiş şekilde artmıştır. - Bitkisel protein oran arttıkça kıvam azalmış, ancak %50 hibrit grupta, su kaybına bağlı katı madde artışı nedeniyle sertlik kontrol grubundan yüksek çıkmıştır. - Bezelye proteininin tamponlama kapasitesi kazein misellerine göre daha düşük olduğundan, %50 bitkisel ikameli yoğurtlarda pH kontrol grubuna göre daha fazla düşmüştür.

Tablo 1. Hibrit Yoğurt Matrislerinde Bitkisel İkame Oranının Fermentasyon Kinetiği ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi (devam)

K a y - nak	Protein kaynağı			Fermen- tasyon Koşulları	Önemli Bulgular
	Hayvansal (H)	Bitkisel (B)	O r a n (H:B)		
Sijts- ma, Ngu- yen ve Spo- elstra (2024)	Tam yağlı inek sütü	Yulaf sütü, bakla tozu ve patates proteini	50:50	YSK ilavesi 43 °C FS pH = 4,6	· Bakla proteini ikamesi görsel olarak başarılı sonuç verse de, ağızda bıraktığı pütürlü his nedeniyle reddedilmiştir. · Patates proteini ise fermentasyon sırasında beklenen pıhtıyı oluşturmamış ve faz ayrılmasına neden olmuştur. · Yulaf sütü ve inek sütü ile 50:50 oranında hazırlanan karışım hem sürdürülebilirlik hem de duyuşal özellikler açısından en başarılı ürün olarak değerlendirilmiştir. · Hibrit yoğurt aynı oranda şeker içermesine rağmen, hayvansal yoğurda göre daha az tatlı algılanmıştır,
Slaví- ková ve ark. (2024)	Tam yağlı inek sütü	Buğday kepeği proteini izolatı (WBPI)	2:98, 5:95	%1 YSK ilavesi 43 °C / 8 saat	· %2 WBPI ilavesi protein oranını %4.6'ya, %5 WBPI ilavesi ise %6.8'e yükseltmiştir. WBPI, ürüne aynı zamanda diyet lifi katkısı da sağlamıştır. · WBPI'nın varlığı, bakteriyel büyümeyi veya fermentasyon sürecini etkilememiştir. Tüm örnekler 8 günlük depolama sonunda >10⁹ canlı hücre/ml sayısını korumuştur. · Artan kuru madde içeriği (%5 WBPI ile %17.5'e ulaşmıştır), su tutma kapasitesini artırmış ve dolayısıyla serum ayrılmasını azaltmıştır. · Tüm zenginleştirilmiş yoğurtlar, psödoplastik ve tiksotropik akış davranışı sergilemiştir. · WBPI'nın doğal acı tadı, fermentasyondan sonunda kalmış ve hibrit yoğurtların genel tüketici kabulünü olumsuz etkilemiştir. · Yüksek WBPI konsantrasyonları (%5), yoğurtta topaklılığı artırmış ve homojenliği azaltmıştır.
Soma- rathne (2024)	Pastörize inek sütü	Bakla sütü (FBM) ve bakla proteini izolatı (FPI)	100:0, 50:50, 0:100	%0.2 YSK ilavesi 37 °C / 10- 12 saat	· %50 FBM ikameli hibrit yoğurt; tekstür, reoloji ve duyuşal özellikler bakımından %100 inek sütü yoğurduna en yakın sonuçları vermiştir. · En yüksek sertlik ve viskozite %100 FPI örneğinde görülürken, %100 FBM en zayıf yapıyı sergilemiştir. · FPI ikameli hibrit yoğurt en yüksek serum ayrılmasını (%64) göstermiştir. · Bakla sütünün neden olduğu "fasulye/otsu" tat, %100 bitkisel ürünlerde beğeniyi düşürürken; %50 FBM içeren hibrit yoğurt duyuşal olarak en çok kabul gören ürün olmuştur. · <i>In vitro</i> sindirim analizinde, %100 bitkisel yoğurtların protein sindirilebilirliği, hibrit ve %100 süt yoğurtlarına göre daha düşük bulunmuştur. Süt ile karıştırma (hibrit), ürünlerin protein hidroliz oranını ve serbest amino asit salınımını iyileştirmiştir.

Tablo 1. Hibrit Yoğurt Matrislerinde Bitkisel İkame Oranının Fermentasyon Kinetiği ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi (devam)

Kaynak	Protein kaynağı			Fermentasyon Koşulları	Önemli Bulgular
	H a y - vansal (H)	Bitkisel (B)	O r a n (H:B)		
Asaduz-zaman ve ark. (2023)	İnek sütü	Soya sütü	100:0, 75:25, 50:50, 25:75 (Tüm gruplar %1,5 oranında kakao içer-mektedir.)	%1 YSK ilavesi 37 °C / 8 saat	·75:25 ikame oranıyla üretilen ürün, sadece inek sütüyle yapılan kontrol ürünüyle neredeyse eşit kalitededir. ·Soya sütü kullanılması, son ürünün protein ve nem içeriğini önemli ölçüde artırmış; buna karşın yağ, toplam kuru madde ve karbonhidrat içeriğini düşürmüştür. ·Soya sütü konsantrasyonu arttıkça ürünün koku, tat, doku ve genel kabul puanları anlamlı biçimde düşmüş; bu durum soyanın karakteristik “fasulye/otsu” tadıyla ilişkilendirilmiştir. ·Laktik asit bakterisi (LAB) sayısı, soya sütü oranı arttıkça kademeli olarak azalmıştır. Ancak tüm formülasyonlar kabul edilebilir standartlarda (>6 log CFU/g) kalmıştır.
Sur-yawanshi, Bornare ve Aitwar (2023)	İnek sütü (düşük yağlı)	Soya sütü (Phule Sangam 726 soya çeşidinden)	1:1, 2:1, 1:2	YSK + <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Lactobacillus casei</i> ilavesi 40-45 °C / 8 saat	· Soya sütünün laktoz ve kolesterol içermemesi sebebiyle hibrit yoğurtlar daha düşük şeker seviyesine sahip olduğu ve özellikle diyabet hastalarının tüketimi için uygun olacağı bildirilmiştir. ·Hibrit formülasyonlarında elde edilen yüksek demir içeriği, hibrit ürünlerin anemi riskini azaltmada etkili olma potansiyelini ortaya koymaktadır. ·Soya sütünün yüksek protein, doymamış yağ asitleri ve izoflavonlar gibi besleyici bileşenlerinden yararlanılarak, düşük şeker ve yağ içeriğine sahip üstün kaliteli hibrit yoğurtlar üretilebileceği sonucuna varılmıştır. ·Duyusal değerlendirmede en yüksek skorlara 1:1 oranında hazırlanan hibrit ürün ulaşmıştır.
Burrowes ve Hekmat (2022)	%1 yağlı inek sütü	Şekersiz badem sütü	100:0, 75:25, 50:50, 25:75	%3 YSK + %4 probiyotik kültür (<i>L. rhamnosus GR-1</i>) ilavesi 37 °C / 6 saat	·Tüm örnekler, fermentasyon ve 30 günlük soğuk depolama boyunca minimum 10⁶ CFU/mL probiyotik gıda kriterini aşarak, en az 10⁸ CFU/mL ortalama mikrobiyal sayısını korumuştur.%75 badem sütü içeren formülasyon, 15 ve 30 günlük depolama sonunda en yüksek ortalama mikrobiyal sayısına ulaşarak LGR-1 canlılığını korumada üstünlük sağlamıştır. ·%50 ve %75 oranında badem sütü kullanıldığında, badem proteinlerinin jel oluşumunu engelleyici özellikleri nedeniyle ürün katı yoğurt yerine akışkan bir kıvamda kalmıştır. ·Badem sütü, geleneksel süt bazlı yoğurtlara diyet lifi, oleik ve linoleik asitler ve polifenoller gibi geliştirilmiş besin değerleri katma potansiyeline sahiptir.

Tablo 1. Hibrit Yoğurt Matrislerinde Bitkisel İkame Oranının Fermentasyon Kinetiği ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi (devam)

Kaynak	Protein kaynağı			Fermentasyon Koşulları	Önemli Bulgular
	Hayvansal (H)	Bitkisel (B)	Oran (H:B)		
Bulut, Adal ve Aktar (2022)	İnek sütü	Nohut proteini (CPP) ve bezelye proteini (PP)	1:100, 1:200	%0,02 Yoğurt starter kültürü ilavesi 42 °C FS pH = 4,6	- Protein zenginleştirme uygulaması, kontrol grubuna kıyasla kıvam, ağız hissi ve yağlılık puanlarını anlamlı düzeyde artırmıştır. Bu iyileşmenin, proteinlerin kazein ağ yapısını güçlendirmesi ve su bağlama kapasitesini yükselmesiyle ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. - Depolamanın 21. gününde, %1 bezelye proteini ilave edilen PP1 grubu yoğurtlar en yüksek sertlik değerini göstermiştir; bu artışın bitkisel proteinlerin kalınlaştırıcı etkisinden kaynaklanmıştır. - Bitkisel protein ilavesi, starter kültür bakterilerinin (özellikle <i>S. thermophilus</i>) sayısını kontrole göre artırmış, CPP1 örneğinde 21. gün sonunda anlamlı derecede yüksek <i>S. thermophilus</i> sayısı (>7 log cfu/ml) tespit edilmiştir. - Bitkisel protein ilavesiyle ürünlerin genel kabul puanlarında özellikle depolama süresi uzadıkça bir miktar düşüş göstermiştir. - Bitkisel protein ilavesi, yoğurtların pH değerlerini anlamlı olarak değiştirmemiş ($p > 0.05$), ancak bezelye proteininin yeşil pigmentleri nedeniyle ürünün L' değerini düşürmüştür.
Ca-non, Mail-lard, Fame-lart, Thier-ry ve Gag-naire (2022)	İnek sütü (yağsız süt tozu ve peynir altı suyu izolatu)	Lupin (Acı Bakla) Proteini İzolatı	50:50, 67:33	Starter kültür ilavesi (<i>Lactococcus lactis</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i>) 42 °C FS pH = 4,7±0,2	- En yüksek duyuşsal sonuçlar ve daha arzu edilen aroma profili, daha yüksek süt proteini içeren 67:33 (Süt:Lupin) oranında elde edilmiştir. 67:33 oranındaki ürünler “hoş” ve “dokulu” olarak, 50:50 oranındaki ürünler ise “hoş olmayan” ve “acı” olarak tanımlanmıştır. - Hibrit ürünlerin, tamamen bitkisel ürünlerin görece alışılmadık duyuşsal özelliklerine uyum sağlamaya başlayan tüketiciler için geçiş sürecini kolaylaştıracağı görüşü bildirilmiştir.

Ziar- no, Zarç- ba, İnek Dry- zek, sütü Hassa- liu ve %2 Flo- rowski (2022)	İnek sütü (UHT, yağlı)	Soya içeceği (UHT, yağlı)	1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1	Starter kültür ilavesi (1. S. <i>thermophilus</i> ve <i>L. delbrueckii</i> <i>subsp.</i> <i>Bulgaricus</i> ; 2. P. <i>freudenreichii</i> <i>subsp.</i> <i>Shermanii</i> 3. 1 ve 2'nin kombinasyonu) 45 °C / 18 saat	·Soya oranı arttıkça, asitlik daha yavaş gelişmiştir. ·Soya içeceği ilavesi, pıhtının sertliğini ve yapışkanlığını istatistiksel olarak önemli ölçüde azaltmıştır. ·En yüksek sertlik değerleri %100 inek sütünden üretilen yoğurtlarda görülmüştür. ·Soya ilavesi arttıkça su tutma kapasitesi düşüp, serum ayrılması artmıştır. ·<i>S. thermophilus</i>, <i>L. bulgaricus</i> ve <i>P. freudenreichii</i> bakterileri hem süt hem de hibrit karışımlarda 21 günlük depolama boyunca yüksek canlılık oranlarını korumuştur. ·Propiyonik bakterilerin kullanımı, daha uzun fermentasyon süresi ve biraz daha yüksek proses sıcaklığı gerektirmektedir. ·Propiyonik asit bakterileri kullanıldığında, soya yoğurtlarındaki gaz yapıcı oligosakkaritler tamamen fermente edilerek tüketilmiştir.

Tablo 1. Hibrit Yoğurt Matrislerinde Bitkisel İkame Oranının Fermentasyon Kinetiği ve Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi (devam)

Kaynak	Protein kaynağı		Oran (H:B)	Fermentasyon Koşulları	Önemli Bulgular
	Hayvan- sal (H)	Bitkisel (B)			
Kavas ve Kavas (2022)	Yumurta beyazı proteini tozu (EWPP)	Badem sütü	94:6, ayrıca %1 oranında sakkaroz veya maltoz ilavesi	%3 YSK ilavesi 42-43 °C FS pH = 4,6	·Hibrit fermente ürünler; fizikokimyasal, reolojik, duyuşal ve mikrobiyolojik özellikler açısından inek sütünden yapılan yoğurda yakın özelliklere sahip olmuştur. ·Badem sütünün doğal olarak düşük karbonhidrat içeriği (inek sütüne kıyasla 4-5 g/100 ml yerine ortalama 0.3 g/100 ml) nedeniyle, fermentasyon sırasında asitlik gelişimini ve jelleşmeyi sağlamak için karbonhidrat ilavesinin zorunlu olduğu bildirilmiştir. ·Maltoz ilavesi, sakkaroz ilavesine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Maltoz, starter kültürlerin (özellikle <i>S. thermophilus</i>'un maltozu hidroliz etme yeteneği sayesinde) aktivitesini artırmış, en yüksek asitlik artışını, viskoziteyi ve sertliği sağlamıştır. ·Depolamanın ilerleyen günlerinde belirgin hale gelen badem aroması panelistler tarafından beğenilmiştir.

Yılmaz-Ersan ve Topçuoğlu (2022)	Rekonstitüe yağsız süt Ticari pastörize badem sütü	100:0, 75:25 50:50, 25:75, 0:100	%3 probiyotik kültür ilavesi (<i>S.hermophilus</i> , <i>L.bulgaricus</i> , <i>L.acidophilus</i> ve <i>Bifidobacterium animalis subsp. Lactis</i>) ⁴⁰ °CFS pH = 4,6	·Badem sütü oranı arttıkça sertlik, kıvam ve viskozite indeksi değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiş, bu durum badem proteinlerinin kazein gibi güçlü üç boyutlu ağ oluşturmaması ile ilişkilendirilmiştir. Badem sütünün yüksek oranlarda kullanımı (%50 ve üzeri), protein ağının zayıflamasına ve kararsız bir jel yapısının oluşmasına neden olmuştur. ·Badem sütü oranı arttıkça ürünün parlaklığı (L*), kırmızılık (a*) ve sarılık (b*) değerleri anlamlı şekilde düşmüştür. ·Hiyerarşik kümeleme analizi sonuçlarına göre, %100 süt yoğurdu ile %25 badem sütü içeren hibrit yoğurt aynı kümede yer alarak birbirine en benzer örnekler olmuştur. ·Panelistler, badem sütü ilavesini %25 oranına kadar beğenmiş ve kabul edilebilir bulmuştur, badem sütünün ürüne “fındıksı/kuruyemiş” bir aroma ve hafif bir tatlılık kattığı değerlendirilmiştir.
Thaha ve Thilakarathne (2021)	Tam yağlı inek sütü Spirulina (Arthros-pira <i>platanensis</i>) ve kırmızı alg (Gracilaria <i>edulis</i>)	0:100; 1:100, 1:50, 1:33 (kırmızı alg); 0,1:100, 0,2:100, 0,3:100 (spirulina)	%1,5 YSK ilavesi 37 °C / 16 saat	·Spirulina ilavesi, protein içeriğini ticari yoğurtlara göre anlamlı derecede artırmıştır. En yüksek protein, %0.3 spirulina ve %2.0 kırmızı alg içeren hibrit üründe belirlenmiştir. ·%1-3 arasındaki tüm kırmızı alg ilave oranları pıhtılaşmayı sağlamıştır. Kırmızı alg, hayvansal jelatinin yerine bitkisel bir jelleştirici ajan olarak başarıyla kullanılmıştır. ·Bitkisel protein ilaveli ekstraktların probiyotiklerin büyümesini engellemediği, aksine spirulina ilavesinin bu bakterilerin gelişimini teşvik ettiği bildirilmiştir. ·Ürün rengi, spirulina konsantrasyonuna bağlı olarak kremden yoğun yeşile kadar değişiklik göstermiştir.

Besin değeri ve fonksiyonel özellikler yönünden hibrit yaklaşım, protein ve amino asit tamamlayıcılığı üzerinden bir sinerji sunmaktadır. Soya proteinlerinin lizin zenginliği ile süt proteinlerinin sülfürlü amino asit katkısı daha dengeli bir profil oluştururken, spirulina ve kırmızı alg ilavesinin protein düzeyini artırabildiği ifade edilmektedir. Fonksiyonel açıdan %25 soya içeren hibrit yoğurtların, sindirim sırasında kazein ve soya kökenli peptitlerin etkileşimiyle en yüksek ACE inhibitör aktivitesini gösterdiği; bitkisel sütlerin laktoz ve kolesterol içermemesi nedeniyle ürünün daha düşük şeker/doymuş yağ asidi profiline yaklaşabildiği ve yulaf ilavesiyle β -glukan gibi kolesterol düşürücü bileşenlerin kazandırılabilirdiği vurgulanmaktadır.

Duyusal kabul ise çoğunlukla koku ve ağız hissi üzerinden şekillenmek-

te; baklagil kaynaklı formülasyonlarda hekzanal ile ilişkili olarak “fasulye/otsu” notaların ortaya çıkabildiği, bazı bitkisel proteinlerin tebeşirimsi-kumsu/pütürlü bir his bırakabildiği ve bezelye/yosun ilavesinin rengi yeşilimsi tona çekerek parlaklığı düşürebildiği belirtilmektedir. Buna karşın kakao, şeker veya yeşil elma aroması gibi maskeleye stratejileri olumsuz tatları azaltarak tüketici beğenisini ve satın alma eğilimini destekleyebilmektedir.

Bu bulgular, hibrit yoğurt tasarımının kazein ağının sağladığı yapısal iskelet ile bitkisel bileşenlerin kattığı sürdürülebilirlik ve sağlık avantajlarını dengelemeyi gerektirdiğini; özellikle %25 ikame eşiğinin üzerindeki artışlarda stabilite ve doku yönetiminin daha kritik hale geldiğini göstermektedir.

SONUÇ

Hibrit yoğurtlar, küresel gıda sistemlerinin karşı karşıya olduğu sürdürülebilirlik krizine ve değişen tüketici taleplerine yanıt veren stratejik bir inovasyon alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada incelenen üretim teknolojileri ve formülasyon stratejileri, hibrit ürünlerin yalnızca bitkisel ve hayvansal kaynakların basit bir karışımı olmadığını; aksine her iki kaynağın tekno-fonksiyonel ve besinsel avantajlarını bir araya getiren sinerjik bir matris olduğunu ortaya koymaktadır. Tıpkı hibrit motor teknolojisinin otomotiv sektöründe bir geçiş köprüsü olması gibi, hibrit yoğurtlar da geleneksel süt ürünleri ile tamamen bitkisel alternatifler arasında, tüketicilerin damak tadından ödün vermeden sürdürülebilir beslenmeye geçişini kolaylaştıran köprü-arabulucu gıdalar olarak tanımlanabilir.

Mevcut literatür ve deneysel bulgular ışığında, hibrit yoğurt üretimindeki en kritik eşiğin dokusal stabilite ve duyuşsal kabul olduğu görülmektedir. İnek sütü proteinlerinin oluşturduğu kazein ağ yapısı, bitkisel proteinlerin (baklagil, tahıl veya yumru kökenli) eklenmesiyle zayıflama eğilimi göstermekte; bu durum viskozite kaybı ve serum ayrılması gibi kalite kusurlarına yol açabilmektedir. Çalışmalar, özellikle %25 ila %30 bandındaki bitkisel ikame oranlarının, geleneksel yoğurt dokusunu korurken besin içeriği bakımından zenginleştirme sağlamak (lif, antioksidanlar, doymamış yağ asitleri) için ideal bir denge noktası olduğunu işaret etmektedir.

Teknik başarının yanı sıra, hibrit yoğurtların pazar başarısı büyük ölçüde tüketici algısının doğru yönetilmesine bağlıdır. Yakın tarihli araştırmalar, tüketicilerin hibrit yoğurtları, hibrit içeceklerle kıyasla daha fazla tercih ettiğini; ancak satın alma kararında lezzet faktörünün, çevresel faydaların önünde geldiğini göstermektedir. Tüketiciler, ürün ambalajlarında protein kaynağı, kalsiyum içerir ve sağlıklı gibi ibareleri pozitif birer dürtü olarak algılasa da, bitkisel kaynaklardan gelen “otsu/fasulyemsi” tatlar ve “kumsu” yapı, ürünün reddedilmesine neden olan temel bariyerlerdir. Ayrıca, protein kaynağının türü de tüketici kabulünde belirleyicidir; bazı tüketici grupları kanola proteinini daha çevreci bulurken, soya bazlı hibritlere karşı mesafe-

li durabilmektedir. Bu nedenle gelecekteki Ar-Ge çalışmaları, sadece besin değerini artırmaya değil, aynı zamanda fermantasyon ve aroma maskeleyme teknikleriyle duyusal profili iyileştirmeye odaklanmalıdır. Sonuç olarak hibrit yoğurtlar, gıda bilimi ve teknolojisinin, biyoteknoloji ve tüketici davranış bilimi ile kesiştiği noktada durmaktadır. Geleneksel gıda sistemlerini modern teknolojilerle harmanlayan bu ürünler, artan dünya nüfusunun protein ihtiyacını karşılarken karbon ayak izini düşürme potansiyeli taşımaktadır. Gelecekteki çalışmaların; farklı coğrafyaların damak tadına uygun yerel bitkisel kaynakların (yer bademi, kenevir, mercimek vb.) kullanımı, raf ömrünü uzatan akıllı paketleme sistemlerinin entegrasyonu ve tüketici güvenini artıracak şeffaf etiketleme stratejileri üzerine yoğunlaşması, hibrit yoğurtların niş bir ürün olmaktan çıkıp ana akım bir gıda maddesine dönüşmesini sağlayacaktır (Curutchet ve ar., 2024; Hernández Olivas ve ark., 2024).

KAYNAKÇA

- Al Noman, M. A., Slaghuis, H., Vos, A., Ngirande, N. G., Oosterhaven, J. K., & Islam, M. N. (2025). Hybrid yoghurt: Enhancing consumer acceptance by combining dairy and plant-based derivatives. *Journal of Dairy Research*, 91(4), 498–504.
- Asaduzzaman, M., Akter, M., Rahman, A., Moniruzzaman, M., Rahman, A., & Islam, M. S. (2023). Development of flavored dahi by incorporating soymilk and cocoa powder. *Asian-Australasian Journal of Bioscience and Biotechnology*, 8(1), 1–7.
- Bulut, M., Adal, E., & Aktar, T. (2022). Plant protein enrichment effect on the physical, chemical, microbiological, and sensory characteristics of yogurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8), e16865.
- Bulut, Z. A., Özkaya, F. T., Karabulut, A. N., & Atağan, G. (2019). Gıda ürünlerinin sürdürülebilir tüketimi bağlamında tüketici tipolojisi geliştirme çalışması. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 73-90.
- Boukria, O., El Hadrami, E. M., Sameen, A., Sahar, A., Khan, S., Safarov, J., Sultanova, S., Leriche, F., & Ait-Kaddour, A. (2020). Biochemical, physicochemical and sensory properties of yoghurts made from mixing milks of different mammalian species. *Foods*, 9(11), 1722.
- Burrowes, A., & Hekmat, S. (2022). Formulation and evaluation of a yogurt-like product made from hemp, oats, and soybeans. *Foods*, 11(18), 2859.
- Canon, F., Maillard, M. B., Famelart, M. H., Thierry, A., & Gagnaire, V. (2022). Mixed dairy and plant-based yogurt alternatives: Improving their physical and sensorial properties through formulation and lactic acid bacteria cocultures. *Current Research in Food Science*, 5, 665–676.
- Curutchet, A., Arcia, P., & Rodríguez Arzuaga, M. (2024). The future of hybrid foods: Will consumers embrace dairy-plant blends? *International Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 8777–8785. doi:10.1111/ijfs.17473
- de Brito, I. S., Tavares Filho, E. R., de Mattos, R. B. E., Pagani, M. M., Mársico, E. T., da Cruz, A. G., ... Esmerino, E. A. (2026). Do hybrid yogurts ease dietary transitions? Multi-method evidence from Brazilian consumers. *Food Quality and Preference*, 138, 105837. doi:10.1016/j.foodqual.2025.105837
- Duru, S. (2025). Sürdürülebilir tarım ve iklim değişikliği. *Muş Alparslan Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 5(1), 21-32.
- Güneş, E., & Karakaş, T. (2022). Tarım ve gıda sistemlerinde sürdürülebilirlik yaklaşımları. *Journal of Academic Value Studies*, 8(3), 304-316.
- Hassan, L. K., El-Azma, M. H., Elaaser, M., EL-Sahra, D. G., Elqattan, G. M., Khat-tab, M. S. A., Abd El-Aziz, M., & Abdel-Wahhab, K. G. (2025). Physiochemical characteristics of date pollen extract-hybrid yoghurt as a functional dairy food modulates hypothyroidic symptoms in modeled rats. *Scientific Reports*, 15, 43277.

- Hernández Olivas, E., Palazzolli da Silva Padilha, M., & Comunian, T. A. (2024). The future of hybrid foods: Trends, technology and strategy for sustainable and novel food development. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 8615–8617. doi:10.1111/ijfs.17443
- Hu, G.-G., Liu, J., Wang, Y.-H., Yang, Z.-N., & Shao, H.-B. (2022). Applications of plant protein in the dairy industry. *Foods*, 11(8), 1067.
- Kavas, N., & Kavas, G. (2022). Yumurta beyazı protein tozu ve farklı disakkaritler ile zenginleştirilen badem sütünden yoğurt benzeri ürün üretimi. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 59(2), 335–346.
- Li, R., Lu, Y., Niu, L., Zhao, Q., Liang, W., Wang, X., & Li, W. (2025). Comprehensive comparison of physicochemical properties, volatile flavor compounds and functional activities of double protein yogurt with different soymilk and cow milk additions. *Food Research International*, 116756.
- Logan, A., Cochet-Broch, M., Reynaud, L., Bouchama, M., Greaves, M., Puvanenthiran, A., & Tobin, A. (2025). Physicochemical and perceived textural attributes of pea and skim milk protein hybrid yoghurts compared to commercial thickened fluids. *Applied Food Research*, 101085.
- Martinussi, F. D. S., Poloto, G., Navarini, G., Marfil, P. H. M., Parra Baptista, D., Gigante, M. L., & Merheb-Dini, C. (2024). The impact of animal protein partial substitution on the technological functionality of hybrid yoghurt. *International Journal of Dairy Technology*, 77(3), 930–939.
- Méndez-Galarraga, M. P., Curutchet, A., & Rodríguez Arzuaga, M. (2025a). Hybrid yogurts: Exploring the functional, sensory and nutritional potential of dairy-plant protein combinations. *Food Reviews International*, 41(7), 2150–2166.
- Méndez-Galarraga, M. P., Curutchet, A., Budelli, E., Oliveira-Rizzo, C., Di Paolo, A., & Arzuaga, M. R. (2025b). Microbiological and physical evaluation of nonfat set-type hybrid yogurts formulated with soy and rice proteins. *Future Foods*, 100835.
- Qin, Y., Xie, S., Zhou, S., Jiang, H., Wang, X., Yin, H., ... Yang, Y. (2025). Incorporation of various pea components in goat yogurt: Microstructure and physicochemical characteristics. *LWT - Food Science and Technology*, 218, 117432.
- Pua, A., Tang, V. C. Y., Goh, R. M. V., Sun, J., Lassabliere, B., & Liu, S. Q. (2022). Ingredients, processing, and fermentation: Addressing the organoleptic boundaries of plant-based dairy analogues. *Foods*, 11(6), 875.
- Ran, J., Pang, S., Li, H., Zhao, R., Zhang, Y., Li, Y., & Yang, M. (2024). Gel properties of mung bean protein-sodium caseinate hybrid yogurt: Physicochemical properties, microstructure, and intermolecular interactions. *Food Chemistry: X*, 24, 101977.
- Sijtsma, H., Nguyen, P., & Spoelstra, R. (2024). *Dairy shop product development: Hybrid drinking yoghurt by using bovine and oat milk* (Bachelor's thesis).

- Silva, T. H. B., Baptista, D. P., de Paiva e Silva, K. K., Marfil, P. H. M., & Gigante, M. L. (2024). Hybrid high-protein yogurt made with partial replacement of milk proteins by pea proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 8806–8815.
- Slavíková, Z., Smatana, I., Diviš, P., Smilek, J., Slaninová, E., & Pořízka, J. (2024). Utilization of wheat bran protein isolate as a fortifier for production of high protein yoghurts. *Mlékarstvo: časopis za unaprjeđenje proizvodnje i prerade mlijeka*, 74(4), 312–323.
- Somarathne, R. (2024). *Development and characterisation of plant-based (faba bean) yoghurt* (Master's thesis). Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- Suryawanshi, S. D., Bornare, D. T., & Aitwar, S. (2023). Synthesis of soya milk and cow milk exceed yoghurt quality. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 11(9), c673–c679.
- Tetra Pak. (2023). *Plant-based fermented products: Navigating the currents of a growing market* Erşim adresi: 15.12.2025 <https://www.tetrapak.com/content/dam/tetrapak/publicweb/gb/en/insights/white-papers/plant-based-fermented-products-white-paper.pdf>
- Thaha, F. H., & Thilakarathne, P. (2021). Protein enrichment of yoghurt using seaweed extracts. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 11(2), 103–107.
- Tümenbatur, A. (2022). Sürdürülebilir gıda sistemleri kapsamında soğuk zincir lojistiğinin değerlendirilmesi. *Five Zero*, 2(1), 35-47.
- Yilmaz-Ersan, L., & Topcuoglu, E. (2022). Evaluation of instrumental and sensory measurements using multivariate analysis in probiotic yogurt enriched with almond milk. *Journal of Food Science and Technology*, 59(1), 133–143.
- Ziaro, M., Zaręba, D., Dryzek, W., Hassaliu, R., & Florowski, T. (2022). Effect of the addition of soy beverage and propionic bacteria on selected quality characteristics of cow's milk yoghurt products. *Applied Sciences*, 12(24), 12603.



AKUATİK EKOSİSTEMLERDE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: GIDA GÜVENLİĞİ TEHDİTLERİ, ETKİLERİ VE STRATEJİLER

“ ”

Seda OĞUR¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi; Bitlis Eren Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Beslenme ve Diyetetik
Bölümü. ogursd@gmail.com ORCID No: 0000-0002-2041-0790

GİRİŞ

Tüm dünyada giderek artan, akuatik ekosistemlerdeki plastik kirliliği hem su canlılarının gelişimini hem de insanların sağlığını olumsuz şekilde etkilemektedir. Makro boyutlu plastiklerin yanı sıra, mikropplastik (MP) ve hatta nano boyutlu plastik (NP)'lerin tespit edilmesine olanak tanıyan teknoloji ve yöntemlerdeki gelişmelerle gıda güvenliğini tehdit eden tehlikenin boyutlarının her geçen gün büyüdüğü görülmektedir.

Plastik atıklar, boyutlarına bağlı olarak genel olarak nanoplastik ($<1 \mu\text{m}$), mikropplastik ($1 \mu\text{m}$ – 5 mm) ve makropplastik ($>5 \text{ mm}$) olarak nitelendirilmektedir (SAPEA, 2019).

Plastikler polimer türü bakımından farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinilklorür (PVC), poliamid (PA), polietilen tereftalat (PET) ve polivinil alkoldür (PVA) (Abidli vd., 2021; Tunçelli ve Erkan, 2020). En yüksek üretim ve atık miktarına sahip oldukları için deniz içerisinde de en çok rastlanılan plastikler PE ve PP plastik türleridir (Abidli vd., 2021; Cappello vd., 2021; James vd., 2020; Tunçelli ve Erkan, 2020).

Bu kirliliğin dinamiklerini, etkili faktörleri ve boyutlarını, ortaya koyan çalışmaların sayısı (Al-Salem vd., 2020; Eryaşar vd., 2024; Gedik vd., 2024; Kaba vd., 2025; Kılıç ve Yücel, 2022; Kurtul vd., 2025a; Matluba, 2023; Park vd., 2022; Parvin vd., 2021a; Selden ve Baker, 2023; Zakeri vd., 2020; Zhang vd., 2021) oldukça fazlayken mikro- ve nanoplastik (MNP) kirliliğinin azaltılması için alınması gereken önlemler, hayata geçirilmesi gereken uygulamaların etkinliği ile ilgili çalışmaların metodolojik çeşitliliği ve saha verileri (Dauvergne, 2018; Padervand vd., 2020; Sun vd., 2019; Talvitie vd., 2017; Xanthos ve Walker, 2017) sınırlı kalmıştır.

Yürütülen çeşitli araştırmalarla bir taraftan farklı akuatik ekosistemlerdeki MNP kirliliğinin boyutları aydınlatılmakta, diğer taraftan su kaynakları ve farklı su canlılarındaki MNP kirliliğinin tespitinde kullanılan yöntemlerin standartlaştırılmasına (Dehaut vd., 2016; Karami vd., 2017; Lares vd., 2019) çalışılmaktadır. Bu çalışmalara paralel olarak aynı zamanda su kaynakları ve su canlıları aracılığıyla akuatik kaynaklı gıda ürünlerine MNP geçişiyle ilgili yasal düzenlemeler de geliştirilmektedir.

MP'lerin halk sağlığı üzerindeki risk düzeyinin belirlenmesi için su canlılarında MP miktarı belirlendikten sonra porsiyon başına ve yıllık tüketim miktarına göre insanların maruz kalabileceği MP miktarı hesaplanmaktadır (EFSA, 2016; Lusher vd., 2017; Mohamed Nor vd., 2021; US EPA, 2001). Bu hesaplamaların doğruluğu çok yüksek olmasa da gözardı edilmemesi ve sürdürülebilirlikle izlenmesi gereken bir seviyede olduğu görülmektedir.

MP'lerin tespitiyle ilgili yöntemlerin geliştirilmesinde önemli bir aşama

katedilmiş, ancak boyut küçüldükçe daha zorlayıcı olduğu ve daha hassasiyet gerektirdiği için NP'lerin tespit yöntemlerinde henüz istenilen başarı elde edilememiştir. Mevcut durum konuyla ilgili uygulamaların hayata geçirilmesini, ilgili yasal düzenlemelerin yürürlüğe konulmasını geciktirmektedir.

Bu kapsamda planlanan kitap bölümünde NP kirliliğinin tespitindeki sınırlılık sebebiyle akuatik ekosistemlerdeki MP kirliliğinin boyutları, gıda güvenliğinde oluşturduğu tehditler, ekolojik etkileşimleri, su canlıları ile insan sağlığı üzerindeki etkileri ve MP kirliliğinin tehlikelerinin ortadan kaldırılmasıyla ilgili gelecek stratejilerinden bahsedilmiştir.

Mikroplastik Kirliliğinin Boyutları ve Gıda Güvenliği Tehditleri

Günümüzde MP partiküllerinin varlığı, okyanusun en derin noktası olan Mariana Çukuru'ndan (Peng vd., 2018) dünyanın en yüksek noktası olan Everest Dağı'na kadar rapor edilmiştir (Napper vd., 2020). MP partikülleri nehir deşarjları (Constant vd., 2020; Pojar vd., 2021), atık su arıtma tesisi deşarjları (Gündoğdu vd., 2018; Habib vd., 2020) ve atmosferik çökeltme (Ding vd., 2021) yoluyla deniz ortamlarına ulaşmaktadır.

Atık plastikler, fiziksel parçalanma, fotoliz ve çevredeki biyolojik bozunma gibi hava koşullarına maruz kalma süreçleri yoluyla küçük parçalara ayrılmaktadır (Moore, 2008). Küresel plastik üretiminin artmasıyla plastik atıklar (özellikle şehirlerin yakınında) her yerde birikebilmektedir. Önemli miktarda plastik atık, yüzey suları yoluyla denize karışmaktadır (Browne vd., 2011; Thompson vd., 2004). Bu nedenle, nehirler ve göller, MP'lerin deniz ortamına göçü için ana yollardır. Balıklar, MP'leri doğrudan veya yanlışlıkla yiyecek olarak tanımlayarak alabilmektedir. Çünkü nehir ve göllerdeki avların büyüklüğü ve rengi MP'lere benzer veya dolaylı olarak MP içeren diğer organizmalar avlanabilmektedir (Batel vd., 2016; Romeo vd., 2015). Yutulduktan sonra, MP'ler balıkların sindirim sisteminin çoğu bölümünü, mide ve bağırsaklar da dahil olmak üzere kirletebilmektedir (Wright ve Kelly, 2017). İnsanlar bu MP içeren balıkları tükettiklerinde gıda güvenliğini tehdit eden MP'lere maruz kalabilmektedir (Karami vd., 2018).

Deniz anemonu (Morais vd., 2020), karides (Nan vd., 2020), yengeç (Patria vd., 2020), balık (Macieira vd., 2021; Pegado vd., 2021) gibi biyoindikatör organizmalar, deniz ortamlarının MP kirlilik durumunu izlemek için başarıyla kullanılmaktadır. Bir balığın biyoindikatör olarak uygunluğu; balığın varlığına, hareketliliğine, ticari değerine, habitatına ve dağılımına bağlı olarak belirlenmektedir (Zhang vd., 2020).

Tatlı sudaki biyota tarafından MP'lerin alınması, tatlı su balıklarında MP kirliliğine bağlı bir risk olduğundan (Carbery vd., 2018; Cole vd., 2011; McNeish vd., 2018b), MP'lerle kirlenmiş balıkların insan tüketimiyle ilgili riskleri değerlendirmek için tatlı su balıklarında ve deniz balıklarında MP

birikiminin periyodik izlenmesi gereklidir (Park vd., 2020b; Silva-Cavalcanti vd., 2017). Son zamanlarda deniz balıklarında MP bolluğunu ölçen önemli çalışmalara (Al-Salem vd., 2020; Auta vd., 2017; Ferreira vd., 2016; Karbalaie vd., 2019; Karlsson vd., 2017; Klangnarak ve Chunniyom, 2020; Lusher vd., 2013; Schmid vd., 2018; Peters vd., 2017) kıyasla, tatlı su balıklarında MP bolluğunu analiz eden çalışmalar daha sınırlıdır (Kusmierek ve Popiolek, 2020; Park vd., 2020a, 2020b; Parvin vd., 2021a; Wang vd., 2020; Zhang vd., 2021).

Güney Kore'deki Han Nehri'nin üç bölgesinde yaşayan 22 türden 106 balık örneğinden 1753 MP tespit edilmiştir. Kuzey Han Nehri'nde bireysel balık başına ortalama $15,60 \pm 13,45$ MP (MP/birey), Güney Han Nehri'nde $16,35 \pm 12,32$ MP/birey ve Han Nehri'nin aşağı kesimlerinde $20,14 \pm 10,01$ MP/birey olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Han Nehri'nin aşağı kesimlerindeki balıkların MP'lerden en fazla etkilenen balıklar olduğunu göstermiştir. Balıklarda tespit edilen MP'lerin baskın boyutu 0,1–0,2 mm arasında değişmiş, balıklarda bulunan en yaygın polimer tipleri PP ($\geq 40\%$) ve PE ($\geq 23\%$) olarak saptanmış ve bunu tüm örnekleme yerlerinde politetrafloroetilen (PTFE) ($\geq 16\%$) izlemiştir. MP sayısı ile balık uzunluğu ($p < 0,01$) ve balık ağırlığı ($p < 0,01$) arasında anlamlı bir korelasyon gözlemlenmiştir. Balıkların beslenme alışkanlıkları ile MP sayısı arasında anlamlı bir fark olduğu ($p < 0,01$), omnivor ve insektivör balıkların etçil ve otçul balıklara göre daha fazla MP içerdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, balık yaşam alanı sonuçları pelajik balıkların demersal balıklara göre daha yüksek düzeyde MP içerdiğini göstermiştir, ancak balık yaşam alanları arasında MP sayısında anlamlı bir fark ortaya çıkmamıştır ($p > 0,05$) (Park vd., 2022).

Hazar Denizi'ndeki toplam avın %50'sinden fazlasını oluşturan iki balık türü (*Chelon aurata* ve *Rutilus kutum*), sindirim sistemlerinde MP varlığı açısından değerlendirilmiştir. Örnekler, Şubat-Mart 2017 tarihleri arasında güney Hazar Denizi'ndeki 6 istasyondan toplanmıştır. Analiz edilen 111 bireyin %67,56'sında MP bulunduğu ve ortalama konsantrasyonun 2,29 MP/balık olduğu, MP'lerin çoğunluğunun lif (%50 civarı) ve partiküllerden (%30 civarı) oluştuğu bildirilmiştir. Bölgedeki nüfusun balığın tamamını tüketmesi nedeniyle, elde edilen temel veriler daha da önem kazanmıştır (Zakeri vd., 2020).

Dünyanın en büyük mangrov ekosistemi olan Bangladeş'in batı kıyısındaki 8 farklı balık türü (5 dip balığı ve 3 pelajik) incelendiğinde her bir balıkta ortalama $7,1 \pm 3,14$ adet MP tespit edilmiştir. Dip balığı türlerinin ($7,78 \pm 3,51$ adet) pelajik türlere ($5,92 \pm 2,06$ adet) göre daha fazla MP tükettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, küçük boyutlu balıkların büyük boyutlu balıklara göre daha yüksek MP/vücut ağırlığı biriktirdiği bulunmuştur. PP en bol bulunan polimer türü (%45) iken lif en yaygın şekil (%71) olmuştur (Matluba, 2023).

Kıyı deniz ekosistemlerindeki MP'ler ve deniz besin ağlarındaki biyomagnifikasyon potansiyeli hakkındaki mevcut bilgileri genişletmek için, Pa-

sifik somonunun (*Oncorhynchus* spp.) ve somon balıkları için önemli bir av olan Pasifik kum mızrağının (*Ammodytes personatus*) midelerinde MP analizleri gerçekleştirildiğinde tüm somonların %77'sinin ve tüm kum mızrağı balıklarının %25'inin en az bir MP içerdiği saptanmıştır. Pasifik kum mızraklarında, kıyı bölgelerinden alınan örneklerde, su altı tortullarından alınan örneklerle kıyasla daha fazla MP bulunmuştur ve korunaklı bir kıyı bölgesindeki kum mızraklarında, açıkta kalan bir kıyı bölgesine kıyasla daha fazla plastik tespit edilmiştir. Pembe somon (*O. gorbuscha*), Chinook (*O. tshawytscha*) ve Coho somonunun (*O. kisutch*) analizleri plastiklerin yaygınlığının türlere göre farklılık gösterdiği, tüm türlerde ağırlıklı olarak liflerin bulunduğu, ancak Chinook somonunda film ve parçacıkların yutulma oranlarının nispeten daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Plastik konsantrasyonları ile mide doluluğu arasındaki karşılaştırmalar hafif bir negatif eğilim göstermiş ve plastiklerin tutulabileceğini düşündürmüştür (Selden ve Baker, 2023).

Etiyopya'nın Ziway Gölü'nde dört ana balık türündeki sindirim sistemi analizleri, örneklenen balıkların %35'inin plastik parçacık yuttuğunu ve balık başına ortalama parçacık sayısının 4 olduğunu göstermiştir. Bentik (*Clarias gariepinus*) ve bentopelajik (*Cyprinus carpio* ve *Carassius carassius*) balık türlerinin, planktonla beslenen balık türlerine (*Oreochromis niloticus*) kıyasla önemli ölçüde daha fazla plastik parçacık içerdiği bulunmuştur. Islak mevsimde kuru mevsime göre daha fazla balığın plastik parçacık yuttuğu saptanmıştır. En büyük plastik boyutu (40 mm lif) *C. carpio*'da tespit edilmiştir. Balıklardaki tahmini ortalama plastik parçacık kütlesinin 0,07 (0,0002–385,2) mg/kg_{ww} ve baskın polimerlerin PP, PE ve alkid vernik olduğu belirlenmiştir. Plastik parçacıkların boyut dağılımlarının logaritmik doğrusal bir yapıya sahip olduğu ve plastik parçacıkların transferinde bentik-pelajik güçlü bir bağlantı olduğu sonucuna varılmıştır (Merga vd., 2020).

Güney Çin'deki İnci Nehri Deltası'nda deniz kültürüyle yetiştirilen melezorfozların (*Epinephelus fuscoguttatus* × *Epinephelus lanceolatus*) mide ve bağırsaklarında ortalama plastik varlığı 35,36 n/birey veya 0,62 n/g olarak saptanmıştır. Balık bağırsağının (23,91 n/birey, yani 1,10 n/g), mideye (12,80 n/birey, yani 0,37 n/g) göre daha fazla MP içerdiği, ayrıca, yutulan MP'lerin büyük çoğunluğunun lif şeklinde (%70,1) olduğu, yaklaşık %70'inin 1 mm'den küçük çaplı olduğu gözlemlenmiştir. Çiftlikte yetiştirilen melez orfoz balıklarının MP yutmasını etkileyebilecek potansiyel faktörler arasında balıkların beslenme şekli ve beslenme ortamlarındaki MP'lerin bulunabilirliğinin yer aldığı belirtilmiştir (Lam vd., 2022). İnci Nehir Deltası'nın yüzey sularında manta çekimlerinde m³ başına 2,4 adet MP konsantrasyonu olduğu (Lam vd., 2020), nehirden alınan istiridyeler ve 26 yabancı balık türü de dahil olmak üzere deniz hayvanlarında MP'lere rastlandığı (Li vd., 2018; Lin vd., 2020) bildirilmiştir.

Orontes Nehri (Lübnan'da doğan, Suriye'den geçen ve Türkiye'den Akdeniz'e dökülen sınır ötesi bir nehir)'ndeki ticari balık türlerinin (Prusya sazanı *Carassius gibelio* (Bloch, 1782); Abu kefali (Heckel, 1843); Sazan *Clarias gariepinus*) gastrointestinal sistemlerinde (GIT) ve solungaçlarında MP'lerin görülme sıklığı sırasıyla %95 ve %74 olarak belirlenmiştir. Çıkarılan MP'lerin çoğunluğu lifli, siyah ve 1000 µm'den küçük boyutlardayken; ana polimer tipleri polyester/PES (%50), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) (%10), PP (%8) ve PET (%5) olarak saptanmıştır (Kılıç vd., 2022).

Türkiye'de Kuzeydoğu Akdeniz'deki MP kirliliğini değerlendirmek için dört farklı ticari balık türü (*Mullus barbatus* (Linnaeus, 1758), *Mullus surmuletus* (Linnaeus, 1758), *Mugil cephalus* (Linnaeus, 1758), *Saurida undosquamis* (Richardson, 1848)) biyoindikatör olarak kullanılmıştır. MP'lerin GIT'de ve solungaçlarda görülme sıklığı sırasıyla %66–100 ve %68–90 arasında değişmiştir. En yüksek MP bolluğu, Asi Nehri ağzından örneklenen *M. cephalus*'un sindirim sisteminde tespit edilmiştir. Çıkarılan MP'lerin çoğunluğu lif şeklinde, siyah renkte ve 1 mm'den küçük boyutlardayken en yaygın polimer türünün PE olduğu görülmüştür (Kılıç ve Yücel, 2022).

Türkiye'deki yetiştiricilikle elde edilen ticari açıdan önemli türlerde (*Onchorynchus mykiss*-gökkuşağı alabalığı (Walbaum, 1792), *Sparus aurata*-çipura (Linnaeus, 1758) ve *Dicentrarchus labrax*-Avrupa levreği (Linnaeus, 1758)) MP yutulması incelendiğinde sindirim sisteminde (GIT) MP görülme sıklığı %50–63 arasında değişmiştir. GIT'deki en yüksek MP bolluğu gökkuşağı alabalığında (1,2 MP/birey), ardından Avrupa levreğinde (0,95 MP/birey) ve çipurada (0,8 MP/birey) tahmin edilmiştir. Çıkarılan MP parçacıkların çoğunun siyah (%61) ve mavi (%27) renkte, lif (%80) şeklinde ve başlıca polimer türlerinin PE (%25), PES (%20) ve PA (%10) olduğu saptanmıştır (Kılıç, 2022).

Akuatik kaynaklardaki MP kirliliği açısından balıklardan sonra ikinci sırada incelenen su canlıları midyelerdir. Dokularında çeşitli kirleticileri biriktirebilen ve büyük miktardaki suları filtreleyebilen sedenter organizmalar olan çift kabuklu su canlıları (bivalvia) bu özellikleri nedeniyle akuatik kaynaklardaki çevresel kirleticileri saptamak için biyoindikatör olarak sıklıkla tercih edilmektedir (Abidli vd., 2021; Abo-Al-Ela ve Faggio, 2021; Alvarez Ruiz vd., 2021; Capo vd., 2021; Cappello vd., 2021; Li vd., 2019; Yozukmaz, 2021). Bu canlılardan olan midyeler hem sosyo-ekonomik değere (dünya çapında yetiştirilip sıklıkla tüketildiği için) hem de ekolojik öneme (besin ağında kilit bir canlı olarak) sahiptir (Beyer vd., 2017). Çoğu deniz canlısının aksine midyeler, gastrointestinal sistemi uzaklaştırılmadan tüm doku ve organları ile direkt olarak tüketildiğinden deniz ortamındaki kirleticilerin gıda yoluyla insanlara doğrudan bulaşmasına neden olmaktadır (Turanlı, 2022; Yozukmaz, 2021). EFSA (2016), orta porsiyon midye (225 g yumuşak doku) tüketildiğinde alınan MP miktarını tahmin etmiş ve bunun yaklaşık 900 MP, yani 7 µg plastiğe eşdeğer olduğunu bulmuştur (25 µm çapında ve 0,92 g/cm³

yoğunluğunda küresel MP'lere dayanarak).

Muğla ilinin Güllük Körfezi'nde dağılım gösteren Akdeniz midyesinin (*Mytilus galloprovincialis*) taze, işlenmiş ve pişirilmiş olarak üç farklı grubuna ait tüm numunelerin MP içerdiği bulunmuştur. Analiz grupları, saptanan toplam MP adedine göre çoktan aza doğru işlenmiş midyeler ($29,2 \pm 19,4$ partikül/birey), taze midyeler ($12,2 \pm 6,5$ partikül/birey), pişirilmiş midyeler ($4,6 \pm 2,5$ partikül/birey) şeklinde sıralanmıştır. En fazla rastlanan MP şekli fibril olurken taze ve pişirilmiş midyelerde en çok siyah renk, işlenmiş midyelerde en çok gri renk tespit edilmiştir. Her üç grupta da $0,1 \mu\text{m}$ – 1 mm aralığındaki MP'lerin daha yoğun olduğu görülmüştür (Temiz, 2023).

Renzi vd. (2018), İtalya'da tüketilen *M. galloprovincialis* türündeki MP birikimini incelediğinde örneklerde görülen tek MP tipi fibril ve baskın plastik renkleri siyah ile mavi olmuştur. MP'lerin ortalama $1,15$ – $2,29 \text{ mm}$ boyutunda olduğu, çiğ midye etinde ortalama $3,90$ adet MP/g, pişmiş midye etinde ise $6,7$ – $7,2$ MP/g bulunduğu görülmüştür. Elde edilen verilere göre insanlar için potansiyel risk değerlendirmesi yapıldığında kişi başı bir porsiyonda (225 g) çiğ midye eti tüketimi sonucunda 1620 adet MP alımı ve pişmiş midye tüketimi sonucunda ise 1395 MP alımı riski olduğu saptanmıştır.

Tunus kıyılarından toplanan yumuşakçalarda (*Mytilus galloprovincialis*, *Ruditapes decussatus*, *Crassostrea gigas*, *Hexaplex trunculus*, *Bolinus brandaris* ve *Sepia officinalis*) MP birikimi incelendiğinde en çok görülen tip fibril (%91,30) olmuştur. Bunu sırasıyla fragment (%5,47) ve film (%3,23) takip etmiştir. İncelenen tüm türlerde $0,1$ – 1 mm aralığında olan MP'lerin daha fazla olduğu görülmüştür. *Mytilus galloprovincialis*'te bu oran %55,93'e ulaşmıştır. Kişi başı yıllık 80 gram yumuşakça tüketimine göre risk değerlendirmesi yapıldığında, midyelerin kişi başı yıllık $43,73$ adet MP alma riski taşıdığı tahmin edilmiştir (Abidli vd., 2019).

Gündoğdu vd. (2020), Türkiye'de satışa sunulan midye dolmalarındaki MP birikimi ile ilgili yaptıkları çalışmada, 5 farklı lokasyondan (İstanbul, Ankara, İzmir, Bodrum ve Adana) ve 41 farklı satıcıdan temin edilen yemeye hazır midye dolmalarını incelemiştir. Örneklenen midye dolmalarının %91,2'sinde MP varlığına rastlanmıştır. En çok MP varlığı, İstanbul (ortalama $0,90$ adet MP) ilinden temin edilen midyelerde görülürken diğer iller İzmir (ortalama $0,81$ MP), Adana (ortalama $0,68$ MP), Ankara (ortalama $0,44$ MP), Bodrum (ortalama $0,33$ MP) şeklinde sıralanmıştır. Bir porsiyonda 100 g midye tüketen bir bireyin $5,76$ tane ve 250 g midye tüketen bir bireyin ise yaklaşık olarak $14,41$ tane MP tüketme riskinin olduğu belirlenmiştir. Tespiti yapılan tüm MP'lerin %54,3 oranında fibril şeklinde olduğu ve geriye kalan %45,7 oranının da parçacık şeklinde olduğu ortaya konulmuştur.

Yozukmaz (2021), İzmir Körfezi'nde yaptığı bir çalışmada iki farklı istasyondan (1. istasyon: Bostanlı ve 2. istasyon: Gülbahçe) topladığı *M. galloprovincialis* ve *Ruditapes decussatus* türlerindeki MP'leri incelemiş ve halk sağlığı risk değerlendirmesi yapmıştır. Araştırma sonucunda elde ettiği verilere göre 1 numaralı istasyondan aldığı midyelerde toplamda 895 adet, 2 numaralı istasyondan aldığı midyelerde toplamda 787 adet MP tespit etmiştir. Yani incelenen toplam 180 adet midyede toplam 1682 adet MP tespit etmiştir. 100 gram midye etinde ortalama 390 adet MP varlığı bulunma riski olduğu saptanmıştır.

Son iki yıldır Türkiye'deki deniz, göl ve nehirlerdeki sularda ve su canlılarından özellikle balıklarda gerçekleştirilen MP araştırmalarının sayısı artmıştır.

Gelingüllü Barajı'ndan (Yozgat) elde edilen sazan (*Cyprinus carpio*), aynalı sazan (*Cyprinus carpio carpio*) ve levrek (*Perca fluviatilis*) örneklerinin solungaçlarında ve GIT'lerinde MP kontaminasyonu araştırıldığında incelenen 77 balığın 58'inde (%75,3) MP partikülleri bulunmuştur. Sazan, aynalı sazan ve levreklerin GIT'lerinde tespit edilen MP kontaminasyon yüzdeleri sırasıyla %46,4 ($1,2 \pm 1,8$ MP/birey), %30 ($0,5 \pm 0,9$ MP/birey) ve %47,4 ($0,9 \pm 1,1$ MP/birey) olarak belirlenmiştir. Öte yandan, sazan, aynalı sazan ve levrek solungaçlarında tespit edilen MP kontaminasyon yüzdeleri sırasıyla %46,4 ($0,7 \pm 0,9$ MP/birey), %53,3 ($0,7 \pm 0,8$ MP/birey) ve %68,4 ($0,8 \pm 0,7$ MP/birey) olarak saptanmıştır (Erdoğan, 2025).

Çeşitli hidrolojik tipleri ve antropojenik baskıları temsil etmek üzere seçilen 24 tatlı su bölgesinde, yerli olmayan *Gambusia holbrooki* türünün 621 bireyinde MP yutulması incelenmiştir. En yaygın şekil lifler (%66) olurken bunu parçacıklar (%23), filmler (%9) ve küreler (%2) izlemiştir. En yaygın polimer tipleri PET (%40) ve PE (%28) iken en sık görülen renkler siyah (%35) ve mavi (%22) olmuştur. Parçacıkların %80'inden fazlasının boyutunun 1 mm'den küçük olduğu gözlemlenmiştir (Kurtul vd., 2025a).

İnsan faaliyetlerinden yoğun olarak etkilenen İzmir Körfezi'ndeki 11 ticari balık türünün GIT'lerinde bulunan potansiyel antropojenik kökenli MP'lerin bolluğu, özellikleri ve kimyasal bileşimi üzerine odaklanan çalışma (Eryaşar vd., 2024) kapsamında 152 balık örneklenmiş ve 64 balıkta MP bulunmuştur. Türler arasında *Scomber scombrus* en yüksek MP yutma oranını göstermiştir. Balıkların GIT'lerindeki MP bolluğunun yüzeyden daha derin sulara doğru azaldığı görülmüştür. Ayrıca pelajik ve demersal balık türleri arasında MP bolluğunda önemli farklılıklar ($p < 0,05$) ortaya çıkmıştır. Sonuçlar, MP'lerin %50,6'sının parçacık, %49,4'ünün ise lif olduğunu göstermiştir. En yaygın renk siyah iken yedi farklı polimer türü tespit edilmiş ve en yaygın olanı PE olmuştur. Tespit edilen MP'lerin boyutları 101–4901 μm arasında değişmiş, ortalama değer $715,83 \pm 860,66$ μm olarak belirlenmiştir (Eryaşar vd., 2024).

Türkiye'deki 22 farklı nehir havzasındaki tüm *Squalius* türlerinden 2004–2018 yılları arasında toplanan balık örneklerinin GIT'lerinde MP varlığı incelendiğinde %20,8'inde MP gözlemlenmiştir. Birey başına ortalama $0,27 \pm 0,19$ MP değeri ve toplamda 91 MP'lik bir kümülatif skor elde edilmiştir. Gözlemlenen MP'lerin çoğu (%79,1) liften oluşurken tanımlanan polimer türleri çoğunlukla PE (%38,5) ve PET (%29,7) olmuştur. MP'ler arasında siyah rengin belirgin olduğu ve uzunluklarının 101–4963 μm arasında değiştiği görülmüştür. Analiz, farklı yıllar ve havzalar arasında ortalama MP değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını ($p > 0,05$) ortaya koymuştur. MP bolluğu ile balıkların büyüklüğü, popülasyon yoğunluğu veya plastik üretim miktarı arasında önemli bir korelasyon bulunmamıştır (Gedik vd., 2024).

Nevşehir'deki Kızılırmak Nehri'nden toplanan *Barbus anatolicus*, *Cyprinus carpio* ve *Capoeta tinca* balık türlerinin kas, karaciğer ve sindirim sistemlerindeki MP'lerin varlığı ve çeşitliliği detaylı olarak incelendiğinde kas dokusunda 82 tane, karaciğerinde 74 tane ve sindirim sisteminde 208 tane MP tespit edilmiştir. MP'lerin büyük çoğunluğu beyaz ve lif şeklindeyken polimerlerin PA, PP, naylon, PE ve PES dahil olmak üzere çeşitli plastik türlerinden oluştuğu görülmüştür (Aras vd., 2024).

Türkiye'nin kuzeybatısındaki Manyas ve Uluabat göllerinden 1963–2004 yılları arasında toplanan 154 adet tahta balığı (*Blicca bjoerkna*) örneği değerlendirildiğinde balıkların yalnızca %3,2'sinin MP'lerle kirlenmiş olduğu ve ortalama $0,04 \pm 0,02$ partikül bulunduğu ortaya konmuştur. Siyah lifler ve beyaz parçacıklar spektroskopik olarak PA ve PET olarak doğrulanmıştır. Bireylerin kirlenme durumu (kirlenmiş/kirlenmemiş), Fulton'ın kondisyon faktörü, göl, örneklem yılı ve cinsiyet ile ilişkili bulunmamıştır. Bu sonuçlar, tatlı su balıklarında zamansal MP kirlenmesini değerlendirmede tarihi koleksiyon örneklerinin faydasını vurgulamıştır (Kurtul vd., 2025b).

İzmir Körfezi'nde (Ege Denizi) ticari balıkçılar tarafından toplanan 13 türe ait 366 balık örneğinin GIT'leri incelendiğinde tüm balık türlerinde MP tespit edilmiş ve ortalama sayı $2,21 \pm 40,7$ adet/birey olarak bulunmuştur. En sık çıkarılan MP türü lif iken en sık tespit edilen MP'ler siyah renkte ve 3 mm'den küçük olmuştur. En sık tüketilen plastik polimerlerin PP (%34,5) ve PET (%32,2) olduğu belirlenmiştir (Bayhan ve Uncumusaoğlu, 2024).

Karadeniz'in güneydoğu kesiminde, yüzey, su sütunu ve sedimentlerdeki dağılımlarıyla birlikte, hem pelajik hem de bentik ortamlardan ticari balık türlerindeki (*Trachurus mediterraneus*, *Merlangius merlangus*, *Mullus barbatus*, *Scophthalmus maximus*, *Platichthys flesus*, *Pegusa lascaris*) MP varlığı incelendiğinde ortalama MP konsantrasyonu yüzey sularında $77 \pm 11 \text{ mp.m}^{-3}$, su sütununda $189 \pm 108 \text{ mp.m}^{-3}$, sedimentlerde $24 \pm 30 \text{ mp.kg}^{-1}$ ve analiz edilen tüm balıklar için $0,91 \pm 0,96 \text{ mp.ind}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Balıklar da dahil

olmak üzere tüm çevresel matrislerde baskın tipin lifler, balıkların GIT'lerindeki en yaygın polimerlerin PET ve poliakrilonitril (PAN) olduğu görülmüştür. MP yutma oranı, pelajik ve bentopelajik türlere kıyasla dip balıklarında istatistiksel olarak daha yüksek bulunmuştur (Aytan vd., 2025).

Marmara Denizi'ndeki Gemlik Körfezi'nde sediment ve ticari balık türlerindeki MP kirliliği değerlendirildiğinde solungaçlardaki en yüksek MP konsantrasyonu (14,5 adet/birey) *Synapturichthys kleinii* (Risso, 1827) türünde, en düşük konsantrasyon (0,33 adet/birey) ise *Diplodus annularis* (Linnaeus, 1758) türünde tespit edilmiştir. GIT'deki en yüksek MP konsantrasyonu (8,75 adet/birey) *Chelidonichthys lucerna* (Linnaeus, 1758) türünde, en düşük konsantrasyon ise (0,88 adet/birey) *D. annularis* türünde görülmüştür. Hem tortu hem de balık örneklerinde en sık tespit edilen MP'ler lif tipi parçacıklar olmuştur. Mikro-Raman Spektrometresi, tortuda PVC ve PP'nin, balık türlerinde ise polioksimetilen ve polifenilen sülfon polimerlerinin baskın olduğunu ortaya koymuştur (Yücedağ vd., 2024).

Karadeniz kıyılarının orta kesiminden dokuz ticari açıdan önemli balık türünde (Avrupa hamsisi *Engraulis encrasicolus*, mezgıt *Merlangius merlangus*, barbun *Mullus barbatus*, sarıkuyruk istavrit *Trachurus mediterraneus*, palamut *Sarda sarda*, izmarit *Spicara smaris*, zargana *Belone belone*, lüfer *Pomatomus saltatrix* ve kum kaya balığı *Neogobius melanostomus*) MP alımı incelendiğinde toplamda, 270 balığın GIT'inde 111 MP tespit edilmiş olup filetolarda hiçbir MP bulunmamıştır. En sık bulunan MP türü lifler iken baskın polimerler polietilen ve polipropilen olmuştur. *Pomatomus saltatrix*, *Engraulis encrasicolus* ve *Neogobius melanostomus* türleri, balık başına ortalama 0,66 ile en yüksek MP yutma oranlarını göstermiştir (Bilgin Fıçıcılar ve Aydın, 2024).

Fırat Nehri'ndeki (Türkiye) MP kirliliğinin ilk entegre değerlendirmesini sunan çalışmada (Altunışık vd., 2025) su, sediment ve ticari açıdan önemli altı balık türüne odaklanılmıştır. MP'ler, su örneklerinin %52,2'sinde (0–6,6 MP/m³) ve sediment örneklerinin %43,5'inde (0–15 MP/kg) tespit edilirken lifler ve PET baskın formlar olmuştur. Balık türleri arasında (*Capoeta trutta*, *Carasobarbus luteus*, *Cyprinus carpio*, *Cyprinion macrostomus*, *Chondrostoma regium* ve *Carassius gibelio*) MP bolluğu birey başına 0,2–1,76 MP arasında değişmiştir. MP yükleri türler veya lokasyonlar arasında önemli ölçüde farklılık göstermemiştir. Dahası, istatistiksel analizler, MP alımı ile yaş, uzunluk veya ağırlık gibi balık özellikleri arasında anlamlı bir ilişki ortaya koymamıştır. Bununla birlikte, *C. trutta*'da nispeten yüksek MP seviyeleri gözlemlenmesinin muhtemelen bentopelajik habitatı ve omnivor beslenme şeklini yansıttığı belirtilmiştir (Altunışık vd., 2025).

Giresun ilinde yaygın olarak tüketilen iki pelajik balık türü (Avrupa hamsisi ve uskumru) ve iki bentik balık türü (barbun ve mezgıt) örneklerinde

MP varlığı, bolluğu ve çeşitliliği araştırıldığında örneklenen balıklardaki genel görülme sıklığı ve ortalama MP bolluğu sırasıyla 17 ve $1,7 \pm 0,18$ MP/balık olarak bulunmuştur. MP'lerin boyutu 0,026–5 mm, çoğu (%41) siyah renkte, baskın polimer türü (%56) PP ve en baskın MP türü lif olarak belirlenmiştir (Tepe vd., 2024).

Güney Marmara Denizi'ndeki beş farklı bölgeden ticari açıdan önemli beş balık türünde (*Engraulis encrasicolus*, *Trachurus trachurus*, *Sardina pilchardus*, *Sarda sarda* ve *Dicentrarchus labrax*) ve Akdeniz midyelerinde (*Mytilus galloprovincialis*) bulunan MP'lerin türü, bolluğu ve özellikleri araştırıldığında balık örneklerinin (n=660) GIT'lerinde toplam 1734 MP, midye örneklerinde (n=50) ise 650 MP tespit edilmiştir. Analizler, MP'lerin bolluğu, boyutu, şekli ve renginde türler arası ve mekansal olarak önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Tanımlanan polimer türleri PE, PP, PVC, PET ve etilen vinil asetat (EVA) iken en yaygın polimerler, sırasıyla “tehlikeli” ve “yüksek riskli” olarak sınıflandırılan tehlike indeksleri gösteren PE ve PP olmuştur (Hacısalihoglu, 2025).

Orta Karadeniz Bölgesi'ndeki Samsun şehrinde ticari açıdan önemli altı balık türünde (gökkuşağı alabalığı-Türk somonu (*Oncorhynchus mykiss*), Avrupa levreği (*Dicentrarchus labrax*), çipura (*Sparus aurata*), barbun (*Mullus barbatus*), sarıkuyruk istavrit (*Trachurus mediterraneus*) ve mezgit (*Merlangius merlangus*)) birey başına düşen MP sayısının $4,73 \pm 1,13$ – $9,26 \pm 2,18$ arasında değiştiği, en yüksek değer in gökkuşağı alabalığında, en düşük değer in mezgitte bulunduğu ortaya konmuştur. 100 μm 'den küçük MP'ler baskın (%48,9) olup, lif (%45,7) ve parça (%36,5) tipleri en sık gözlemlenen morfolojiler olmuştur. Renk dağılımı açısından siyah ve beyaz/şeffaf renkler öne çıkarken, ATR-FTIR analizi, PP (%31,3) ve PE (%23,9) gibi yaygın olarak kullanılan tüketici plastiklerinin baskınlığını göstermiştir. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM/EDS) ile birleştirilmiş taramalı elektron mikroskopu sonuçları, MP morfolojisiyle tutarlı olarak, mikroskobik ölçekte düzensiz, lifli ve parçalanmış yapıların varlığını doğrulamıştır (Şimşek, 2025).

Van Gölü'ne dökülen nehirlerden toplanan su ve balık örneklerinde MP kirliliğinin durumu araştırıldığında hem su hem de balık örneklerinde lifler baskın olup, en sık tanımlanan polimerler PET ve PAN olmuştur. Tarek/İnci kefali (*Alburnus tarichi*) (ortalama 1,50–2,25 MP/birey), Van çöpçü balığı (*Oxynoemacheilus ercisanus*) (ortalama 0,55 MP/birey), kerkenkele bıyıklı balığı (*Barbus lacerta*) (ortalama 0,57 MP/birey) ve siraz balığı (*Capoeta damascina*) (ortalama 1,00–1,75 MP/birey) gibi endemik ve/veya ekonomik açıdan önemli balık türlerinde MP'lerin varlığını kanıtlamıştır (Kaba vd., 2025).

Mikroplastik Kirliliğinin Ekolojik Etkileşimleri

Plastikler mekansal ve zamansal olarak heterojendir ve küçük ölçeklerde büyüklük derecesine göre değişiklik gösterebilir (Law ve Thompson, 2014).

MP'ler plajlarda, okyanus yüzeyinde (Cózar vd., 2014; Eriksen vd., 2014), su sütununda (Lattin vd., 2004; van Sebille vd., 2020) ve deniz sedimentlerinde (Chubarenko vd., 2018; Chubarenkoa vd., 2020; Fischer vd., 2015; Zobkov ve Esiukova, 2017) bulunur. Ayrıca, türler, coğrafi konum, yaşam alanı ve trofik seviye arasında yüksek oranda değişkenlik gösteren çok çeşitli balık türlerinin de plastik maddeleri yuttuğu bilinmektedir. Bu nedenle, MP'lerin ekosistem genelindeki yaygınlığını ve hem habitatlar hem de türler üzerindeki potansiyel etkisini değerlendirmek önemlidir (Rochman, 2018). Plastikler, gemi taşımacılığı ve ulaşım, yüzey akışı, atık su, rüzgar ve kıyı su yolları dahil olmak üzere birçok yolla deniz ortamlarına girmektedir. MP'ler, karasal girdilere yakınlık (Barnes vd., 2009; Browne vd., 2010; Doyle vd., 2011), atık birikimi için elverişli koşullar sağlayan gelgit süreçleri (Ryan vd., 2009), dalga hareketi ve UV ışığına maruz kalma gibi toplu olarak parçalanmayı teşvik eden faktörler nedeniyle kıyı bölgelerinde özellikle belirgin olabilir (Andrady, 2011). Kıyı deniz ekosistemlerinin, açık denizdeki benzerlerine kıyasla daha yüksek MP kirliliği konsantrasyonlarına sahip olduğu gösterilmiştir (Desfor- ges vd., 2014). Kıyıya yakın ortamlar ve orada yaşayan organizmalar, özellikle plastiklerin kıyıya yakın balık yavru yetiştirme alanlarında yoğunlaştığı yer- lerde, en çok etkilenenler arasında olabilir (Gove vd., 2019). MP'ler hem suda hem de tortuda bulunduğundan (GESAMP, 2015) hem bentik hem de pelajik besleyiciler MP'leri yutma potansiyeline sahiptir.

Deniz suları tatlı su kaynaklarına göre plastik kirliliğine daha fazla maruz kalmaktadır. Atıksu arıtma tesisleri, endüstriyel deşarjlar, tarımsal akıntı, yoğun gemi trafiği ve balıkçılık faaliyetleri gibi birçok kirlilik kaynağıyla çevrili yüksek oranda kentleşmiş kıyı bölgeleri, deniz sularında önemli kirlilik sorunlarına neden olmaktadır (Suaria vd., 2016).

MP'lerin su ortamlarına girişindeki birincil kaynaklar; nehir deşarjlarından (Constant vd., 2020; Pojar vd., 2021), tekstil, kozmetik ve elektronik ürün- lerden (Prokić vd., 2019; Rezania vd., 2018), araç kullanımıyla oluşan lastik aşınmasından, şehir tozundan, yol yapımı ve deniz kaplamalarından (Miloloža vd., 2021) oluşmaktadır. İkincil MP'ler ise atık su arıtma tesisi deşarjlarından (Kang vd., 2018), plastik poşetler, şişeler, balık ağları gibi daha büyük plastikle- rin parçalanmasından, kanalizasyon çamuru uygulaması gibi tarımsal faaliyet- lerden, vinil kaplamalardan (Miloloža vd., 2021; Nizzetto vd., 2016; Prokić vd., 2019) ve atmosferik çökelden (Ding vd., 2021) kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, besleme çiftlikleri, ağlar, halatlar ve borular gibi su ürünleri ye- tiştirme ekipmanlarının büyük çoğunluğu plastik malzemelerden yapılmış- tır. Bu nedenle, su ürünleri yetiştirme tesisleri de potansiyel bir MP kaynağı olarak kabul edilmektedir (Feng vd., 2020a; Zhu vd., 2019; Wu vd., 2020). Benzer şekilde, su ürünleri yetiştirme çiftlikleri söz konusu olduğunda, diğer balıkların sindirim sistemlerinden yapılan balık yemlerinin de MP kaynağı olduğu bildirilmiştir (Hanachi vd., 2019; Wang vd., 2022).

Deniz sularında uzun süre kaldıkları süre boyunca, MP'ler fiziksel ve kimyasal olarak bozunmaya uğrayarak plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, antimikrobiyal ajanlar, Bisfenol A gibi kirleticilerin salınmasına neden olmaktadır (Smith vd., 2018). MP'lerden kaynaklanan ekolojik endişe, MP'lerin çeşitli deniz organizmaları tarafından av olarak yanlış tanımlanabilmesinden (Guzzetti vd., 2018; Hall vd., 2015; Li vd., 2016; Lusher vd., 2017; Saeed vd., 2020; von Moos vd., 2012; Vroom vd., 2017) ve yutulduğunda zehirli hatta ölümcül olabilmesinden kaynaklanmaktadır (Prinz ve Korez, 2020). Çevrede salınan hem birincil (peletler, mikro boncuklar) hem de ikincil (parçalanma ve ayrışma sonucu oluşan) MP'ler (GESAMP, 2019) kalıcı ekolojik etkileşimlere sebep olmaktadır.

Mikroplastik Kirliliğinin Su Canlıları Üzerindeki Etkileri

MP'lerin zooplankton (Beer vd., 2018; Sun vd., 2018), çift kabuklular (Wu vd., 2020; Yozukmaz, 2021), kabuklular (Abbasi vd., 2018; Wu vd., 2020) ve balıklar (Aytan vd., 2021; Gündoğdu vd., 2020) tarafından yutulduğu bildirilmiştir. MP yutulması deniz organizmalarına birçok şekilde zarar verebilir. Birincisi, yutulan MP'ler sindirim sisteminde tıkanıklığa neden olabilir (Walkinshaw vd., 2020). İkincisi, nano ve/veya mikro boyutlu parçacıklar bağırsakta ve diğer dokularda emilebilir (Abbasi vd., 2018) ve bu da farklı organlarda birikime yol açabilir (Ivleva vd., 2017). Son olarak, bu maddeler kimyasal kirleticiler için adsorpsiyon bölgeleri sağlayarak kimyasal kirleticilerin deniz organizmalarının vücuduna girmesine sebep olabilir (Tien vd., 2020).

Su ortamındaki MP sayısı arttıkça, MP'ler ile su hayvanları arasındaki etkileşim de artmaktadır. Kaçınılmaz olarak, plankton (Beer vd., 2018), su bitkileri (Feng vd., 2020b; Gao vd., 2021), balıklar (Kılıç vd., 2022; Kılıç ve Yücel, 2022), deniz memelileri (Fossi vd., 2018) gibi birçok su canlısı, küçük boyutları ve yüzer özellikleri nedeniyle MP'lerin varlığından olumsuz etkilenmektedir (Anderson vd., 2016). Tüm su canlıları arasında, MP'lerin yutulmasının onlar üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olabileceği için hayvanlar daha fazla dikkat çekmektedir (Feng vd., 2020b, Gao vd., 2021).

Deniz çöplerinden en çok etkilenen deniz canlıları, %21,93 oranıyla balıklar, %18,43 oranıyla deniz kuşları, %11,68 oranıyla deniz kabukluları ve eklembacaklıları, %7,79 oranıyla deniz yumuşakçaları ve %6,28 oranıyla deniz memelileridir (Alnajar vd., 2021; SDÇEP, 2019; Tekman vd., 2017). Deniz omurgasızlarından mavi midye, Akdeniz midyesi, kaya midyesi, beyaz kum midyesi, istiridye, karides, ıstakoz ve amfipodlarda yapılan çalışmalarda bu canlıların beslenme yoluyla MP'leri doğrudan bünyesine aldıkları görülmüştür (Alnajar vd., 2021; Kırcan, 2020).

MP kirliliği ve etkileri hakkında doğru bir değerlendirme yapmak için, balıkların MP yutma durumunu potansiyel olarak etkileyen içsel koşulları (yani, balığın boyutu, beslenme grupları, habitat tercihleri) ve çevresel fak-

törleri anlamak önemlidir. MP'lerin deniz organizması üzerindeki etkisi, ortamdaki kirletici miktarına değil, organizmanın kirleticiye ne kadar şiddetli maruz kaldığına bağlıdır. Maruz kalma şiddeti, esas olarak kirleticinin temasını ve alımını düzenleyen çeşitli içsel ve dışsal faktörlerin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Örneğin, Brezilya'nın güneyindeki akarsulardan elde edilen verilere göre, omnivor balıklarda daha yüksek bir alım bildirilmiştir (Garcia vd., 2020). Dahası, kondisyon faktörü ile MP yutma arasındaki negatif ilişkiye ek olarak, diğer beslenme gruplarına kıyasla omnivor balıklar tarafından daha yüksek sayıda MP (özellikle lif parçacıkları) yutulması bildirilmiştir (Mizraji vd., 2017).

Ticari açıdan önemli balık türlerinde MP alımını araştırmak ve alım durumunu etkileyen biyolojik ve çevresel faktörleri değerlendirmek için yürütülen çalışmada (Koralan vd., 2022) toplam 17 türe ait 2222 bireyin GIT içeriği MP varlığı açısından incelenmiştir. Değerlendirilen 17 türün 13'ünde MP alımı tespit edilmiştir. İncelenen balıkların %18,1'inin MP aldığı ve tespit edilen parçacıkların ortalama uzunluğunun $1,26 \pm 1,38$ mm olduğu görülmüştür. En baskın MP türü lif (%90,1), en yaygın partikül renkleri siyah (%46,9) ve mavi (%29,4), en yaygın polimer türü PP (%85) olmuştur. Yapılan değerlendirmeler kıyı bölgelerinde yaşayan balıkların MP kirliliğine maruz kalmasının fiziksel (yağış ve en yakın kıyıya uzaklık) ve biyolojik (fonksiyonel trofik grup, türün yaşam alanı) faktörlerle ilişkili olduğunu göstermiştir.

Güney Kore'deki Han Nehri'nin üç bölgesinde yaşayan 22 türle gerçekleştirilen çalışmada (Park vd., 2022) MP sayısı ile balık uzunluğu ($p < 0,01$) ve balık ağırlığı ($p < 0,01$) arasında anlamlı bir korelasyon gözlemlenmiştir. Balıkların beslenme alışkanlıkları ile MP sayısı arasında anlamlı bir fark olduğu ($p < 0,01$), omnivor ve insektivor balıkların etçil ve otçul balıklara göre daha fazla MP içerdiği bulunmuştur. Ek olarak, balık yaşam alanı sonuçları pelajik balıkların demersal balıklara göre daha yüksek düzeyde MP içerdiğini göstermiştir, ancak balık yaşam alanları arasında MP sayısında anlamlı bir fark saptanmamıştır ($p > 0,05$).

Yutulan MP'lerin akuatik organizmalar üzerindeki potansiyel etkileri, fiziksel ve kimyasal etkilerinden kaynaklanmaktadır (Barboza vd., 2019). MP'lerin neden olduğu olumsuz etkilerin sebepleri şunlardır: 1) parçacıkların kendileri, 2) plastik ürünlerin üretiminde kullanılan katkı maddeleri ve/veya 3) çevrede kalıcılıkları sırasında plastik atıklara adsorbe olan kirleticiler (Hermabessiere vd., 2017). MP toksisitesi üzerine literatür (Jeong ve Choi, 2019) kısmen mevcut olsa da, deniz organizmalarında MP'lerin yutulmasının neden olduğu toksikolojik etkiler hakkındaki bilgi hala sınırlıdır. Ancak, yapılan bazı deneysel maruz kalma çalışmaları, 0,001 mg/L'den itibaren maruz kalma konsantrasyonlarının, genotoksosite, oksidatif stres, davranış değişiklikleri, üreme bozukluğu, ölüm, popülasyon büyüme hızında azalma ve nesiller arası etkiler de dahil olmak üzere çeşitli fiziksel ve kimyasal toksisiteye

neden olabileceğini öne sürmektedir (Alomar vd., 2017; Avio vd., 2015; Barboza vd., 2019; Oliveira vd., 2013).

MP yutulması, sindirim sisteminde tıkanıklığa (Walkinshaw vd., 2020), bağırsak ve solungaçlarda değişikliklere neden olur (Karbalaeei vd., 2021; Peda vd., 2016). MP'ler ayrıca balık davranışlarında değişikliklere yol açar; örneğin yüzme hızında azalma ve beslenme davranışında değişiklik (Barboza vd., 2018; Rios-Fuster vd., 2021). Ayrıca, kimyasal kirleticiler MP parçacıklarına yapışır ve balık vücudunda desorbe olur. Başka bir deyişle, MP'ler kirletici taşıyıcılar gibi davranır ve toksik kimyasalların balık vücuduna girmesi için bir kapı görevi görür (Khan vd., 2020; Tien vd., 2020). Bu kimyasalların MP'lerle birleşimi oksidatif strese, inflamasyon biyoindikatörlerinde artışa, solungaç ve karaciğerde biyobirikime, karaciğer detoksifikasyonuna, detoksifikasyon biyoindikatör yanıtlarında varyasyona ve lipid dağılımında değişikliklere neden olur (Capó vd., 2022; Granby vd., 2018; Hanachi vd., 2021; Herrera vd., 2022; Solomando vd., 2021).

Akhbarizadeh vd. (2018), Basra Körfezi'ndeki balıkların kaslarından önemli miktarda ağır metal (cıva ve selenyum) içeren MP'ler çıkarmıştır. MP'lerin sucul yaşamda genotoksisite, sitotoksisite, bağışıklık sistemi bozukluğu ve enerji bozulmasıyla bağlantılı olduğu bilinmektedir (Avio vd., 2015; Barboza vd., 2018). Kirlenmiş PE plastik kalıntılarının, Japon medaka balıklarında vitellogenin, koryogenin ve östrojen reseptörü gen ekspresyonunu baskılayarak endokrin bozulmasına neden olduğu bulunmuştur (Mak vd., 2019).

Mikroplastik Kirliliğinin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Balıkların MP'lere maruz kalması sadece balık sağlığı açısından değil, aynı zamanda halk sağlığı açısından da bir sorundur. Çünkü yutulan MP'ler balık vücudunda dolaşarak kas gibi tüketilebilir dokulara geçebilir (Zeytin vd., 2020).

Günümüzde, insanların plastik atıklara maruz kalmasının ciddiyeti belirsizdir, ancak insan sağlığına ilişkin endişeler oldukça büyüktür (Hanachi vd., 2019; Reinold vd., 2021; Savoca vd., 2021). Yabani deniz ve tatlı su türlerini inceleyen çalışmalar artmaktadır (Perumal ve Muthuramalingam, 2021), ancak çiftlik balıklarında MP'lerin yutulmasını inceleyen çalışmalar oldukça azdır (Kılıç, 2022).

MP'lerin, ağır metaller, endokrin bozucu kimyasallar, kalıcı organik kirleticiler ve ayrıca biyosidal döngüdeki organik kirleticiler gibi kirleticilerin taşıyıcısı olarak hareket ettiği bilinmektedir (Ashton vd., 2010; Neves vd., 2015; Rios vd., 2007). Bu toksik maddeler, hareketlilik, üreme ve kanser gelişimi de dahil olmak üzere önemli biyolojik süreçler üzerinde etkiye sahip olabilir (Fossi vd., 2018; Lithner vd., 2011).

Ticari açıdan önemli birçok balık türünün midelerinde MP'lerin bulunması, insan sağlığı için potansiyel bir risk oluşturmaktadır (Fossi vd., 2018; Neves vd., 2015). Şu anda 660'tan fazla deniz türünün plastiklerden etkilendiği bilinmektedir. Genellikle deniz biyotasında yutulan MP'ler dışarı atılır, bazen gastrointestinal sistemde kalır, potansiyel olarak yanlış doygunluğa veya hasara neden olur ve bazı durumlarda, daha küçük boyutlara parçalanırlarsa, bağırsak duvarını geçerek dolaşım sistemine de girebilir (Avio vd., 2015).

İnsanlarda MP yutma riski, tüketilen çoğu deniz ürününde sindirim sisteminin çıkarılmasıyla azalır. Bununla birlikte, çoğu çift kabuklu türü ve birkaç küçük balık türü bütün olarak tüketilir, bu da MP maruziyetine yol açabilir. Bir porsiyon midye (225 g) tüketiminden sonra MP'lere maruz kalmanın en kötü senaryo tahmini, 7 µg plastik yutulmasına yol açmaktadır. Belirli PBT (kalıcı, biyolojik olarak biriken ve toksik kirleticiler)'lere ve plastik katkı maddelerine kimyasal maruziyet üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye (toplam diyet alımının %0,1'inden az) sahip olacaktır (FAO, 2017).

Henüz standartlaşmış tek bir "MP risk hesaplama" formülü olmasa da, bilimsel araştırmacılar Çevresel Kimyasal Risk Değerlendirmesi çerçevesini MP'lere uyarlamaktadır (Koelmans vd., 2017). MP'lerin halk sağlığı risk değerlendirmesi yapılırken mevcut çevresel kirleticilerde olduğu gibi kronik günlük alım (CDI), zarar katsayısı (HQ) ve referans doz (RfD) değerleri hesaplanarak $HQ > 1$ ise sağlık açısından potansiyel bir risk olduğu kabul edilmektedir (Karbalaeei vd., 2019; US EPA, 2001). Ancak MP'ler için kesin bir RfD değeri henüz yetkili otoritelerce (Dünya Sağlık Örgütü-WHO, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi-EFSA) netleştirilmediğinden (EFSA, 2016; WHO, 2019), araştırmacılar genellikle hayvan deneylerinden (in vivo) elde edilen verileri ve gözlemlenemeyen etki seviyesi (NOAEL) değerlerini kullanarak hesaplama yapmaktadır (Mohamed Nor vd., 2021).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) gibi kurumlar şu an MP'leri değerlendirirken şu zorluklarla karşı karşıyadır:

- **Standart Yöntem Eksikliği:** Her laboratuvarın farklı ölçüm yöntemleri (stereomikroskopi, SEM (taramalı elektron mikroskobu), FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi), Raman spektroskopisi, Pry-GC/MS (Pirroliz-Gaz Kromatografisi/Kütle Spektrometresi) vb.) kullanması sonuçların karşılaştırılmasını ve riskin küresel ölçekte harmonize edilmesini zorlaştırır (WHO, 2022).

- **Parçacık Toksisitesi:** Kimyasallardan farklı olarak parçacık boyutu azaldıkça (NP seviyesinde) hücre membranlarından geçme ve dokulara nüfuz etme riski arttığı için toksisite doğrusal bir artış göstermeyebilir (EFSA, 2016; Smith vd., 2018).

• **Biyo-birikim:** MP'ler vücuttan atılabileceği gibi, lenf düğümlerinde veya organlarda (karaciğer, dalak vb.) birikerek uzun vadeli kronik inflamatuar etkiler yaratabilir (Prata vd., 2020; Wright ve Kelly, 2017).

EFSA, 2025 yılında gıda ambalajlarından MP salınımına dair bir literatür taraması yayınlamış, ancak insan maruziyeti ve toksikokinetik konularındaki mevcut veri eksikliklerinin, bu aşamada tam bir risk karakterizasyonunu engellediğini belirtmiştir. Standartlaştırılmış izleme verilerinin elde edilmesinin ardından, kapsamlı bir risk değerlendirmesinin 2027 yılında tamamlanması planlanmaktadır. Bu raporla birlikte ilk kez resmi referans dozlar hayatımıza girebilir (EFSA, 2025).

MP'lerle kontamine olmuş su ürünlerinin insanlar tarafından tüketilmesi ile MP'lerin besin zincirinin üst basamaklarına kadar aktarıldığı tespit edilmiştir (Catarino vd., 2018). Ayrıca MP'ler solunum, yutma vb. çeşitli yollarla da insan vücuduna alınabilmektedir (Bulat ve Kılınç, 2020; Wright ve Kelly, 2017). İnsan plasentasında dahi varlığı raporlanmış olan MP'ler nedeniyle oluşan toksisitenin bağışıklık sistemini baskılayarak patojenlere karşı savunma mekanizmalarını zayıflatmakta olduğu düşünülmektedir (Ragusa vd., 2021; Wright ve Kelly, 2017). Ancak MP'lerin, insan sağlığı açısından risklerinin belirlenebilmesi için partiküllerin şeklinin, büyüklüğünün, kimyasal yapısının, içerdiği katkı maddelerinin ve alınan miktarın net olarak bilinmesi gerekir (Waring vd., 2018).

MP'lerin insan vücudunda emilimine ilişkin veriler azdır veya mevcut değildir. Memeliler üzerinde yapılan çalışmalarda lenfte 150 µm'ye kadar boyutlarda mikropartiküller tespit edilmişken, bir çalışmada portal vende PVC parçacıkları (110 µm) tespit edilmiştir. 150 µm'den büyük MP'lerin emilmesi çok muhtemeldir. Sonuç olarak, sadece bağırsakta lokal etkiler, yani bağışıklık ve inflamatuar yanıtlar beklenebilir. Daha küçük MP'ler (<150 µm) sistemik maruziyete yol açabilir, ancak mevcut veriler emilimin sınırlı olduğunu ($\leq 0,3\%$) göstermektedir. Sadece en küçük fraksiyon (boyut ≤ 20 µm) organlara nüfuz edebilir (FAO, 2017).

2018 yılında ilk kez, daha önce su ürünleri tüketmiş olan Avrupa ve Japonya'dan sekiz kişinin dışkıсында MP'lere rastlanmıştır (Schwabl vd., 2019). Leslie vd. (2022), test edilen kişilerin %80'inin kanında MP bulunduğunu bildirmiştir ki bu insanlık için endişe verici bir haberdur. Bununla birlikte, MP'lerin insan sağlığı üzerindeki etkisi hakkında net bir çalışma bulunmamaktadır. İçsel maruziyet sonrasında MP'lerin fizikokimyasal ve mikrobiyolojik toksisiteye neden olabileceği ve bunun da kalp hastalığı, tip 2 diyabet, kanser, obezite, sitokin salgılanması, hücresel parçalanma, inflamatuar hastalıklar, DNA bozulması, nörotoksik ve metabolik etkiler, üreme ve gelişim bozuklukları vb. sorunlara yol açabileceği öngörülmektedir (Prüst vd., 2020; Wright ve Kelly, 2017; Yong vd., 2020).

Mikroplastik Kirliliğiyle İlgili Gelecek Stratejileri

Balık, omega yağ asitleri içeriği nedeniyle insan beslenmesinde vazgeçilmez bir protein kaynağıdır (FAO, 2020). Bununla birlikte, balıkların çevrelerinde maruz kaldığı fiziksel ve kimyasal kirleticiler halk sağlığı açısından endişe yaratmaktadır. Tüm kirleticiler arasında, MP'ler ve bunların su hayvanlarındaki varlığı en son incelenen gruptur, çünkü bu konudaki endişeler hala çözülmemiştir. Bu nedenle, MP kirliliği, su ürünleri yetiştiriciliği sektörünün sürdürülebilir gelişimi için potansiyel bir tehdittir ve dikkatle ele alınması gerekmektedir (Savoca vd., 2021). MP'lerin insanlar tarafından alınmasının ana yolunun balık tüketimi olduğu göz önüne alındığında, çiftlik balığı türlerinde de MP alımının araştırılması gerekmektedir (Kılıç, 2022).

Deniz Stratejisi Çerçeve Direktifi, AB üye devletlerini deniz ortamlarındaki plastik ve MP yoğunluğu açısından iyi bir ekolojik duruma ulaşmaya teşvik etmiştir (European Commission, 2010). O zamandan beri, sadece deniz ortamlarındaki MP yoğunluğunun belirlenmesi değil, aynı zamanda yutulan MP parçacıklarının deniz organizmaları üzerindeki potansiyel etkileri de güncel bir endişe kaynağı olmuştur.

Deniz ve tatlı su balıklarındaki MP çalışmalarına rağmen, kültür balıkçılığında MP yutulması, yabani balıklardakine kıyasla daha az ilgi görmektedir. Yürütülen çalışmalardan bazıları (Chan vd., 2019; Reinold vd., 2021; Wu vd., 2020) kıyıya yakın deniz alanlarında yetiştirilen balıkları değerlendirirken diğerleri balık havuzlarında (Cheung vd., 2018) ve tatlı su balık çiftliklerinde (Garcia vd., 2021) yetiştirilen balıklara odaklanmıştır. Ticari balık türlerinde MP'lerin varlığına ilişkin sınırlı veri bulunması ve küresel su ürünleri yetiştiriciliğinde devam eden artış (örneğin, 1987'den 2017'ye sekiz kat artış; Naylor vd., 2021) göz önüne alındığında, su ürünleri yetiştiriciliği endüstrisinin ve ürünlerinin MP kirliliğinden ne ölçüde etkilendiğini araştırmanın zorunlu olduğu görülmektedir.

Avrupa iç sularının kalitesini düzenleyen Su Çerçeve Direktifi'nde plastik kirliliği için standartlar bulunmamaktadır (European Commission, 2000). Deniz ve tatlı su ortamları tamamen farklı fizikokimyasal özelliklere sahiptir. Tatlı su ekosistemleri antropojenik etkilere daha duyarlıdır, genellikle daha yüksek miktarda MP partikülü içerir ve farklı bir kimyasal set içerir (Scherer vd., 2018). Bu nedenle, deniz ve tatlı su ortamlarındaki MP kirliliğinin farklı açılardan incelenmesi, ilgili gıda güvenliği tehditlerinin ortadan kaldırılması için gerekli önlemlerin alınması ve yasal standartların yürürlüğe konulması son derece önemlidir.

Plastiklerin tüm deniz çöplerinin %80'inden fazlasını oluşturduğu ve balıkların yanı sıra memeliler, deniz kaplumbağaları ve omurgasızlar da dahil olmak üzere 900'den fazla deniz türünün plastik atıklardan zarar gördüğü bildirilmektedir (Boucher ve Friot, 2017; Kühn ve Van Franeker, 2020). Bu

sebeple sadece su ve balıklarda değil farklı akuatik kaynaklardaki farklı canlı türlerindeki plastik kirliliğinin boyutlarının da araştırılması gerektiğine bilimsel araştırmacıların ve kamuoyunun dikkati çekilmelidir.

Akuatik kaynakların MP kirliliği öngörülebilir gelecekte artmaya devam edecektir. Su ortamlarında ve organizmalarda daha küçük boyutlu MP'lerin ($150\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük) varlığı ve bunların su ürünleri güvenliği üzerindeki olası etkileri konusunda önemli bilgi eksiklikleri bulunmaktadır. Şu anda su ortamlarında ve organizmalarda NP'lerin gözlemlenmesi ve nicel olarak belirlenmesi için mevcut bir yöntem bulunmamaktadır (FAO, 2017).

Su ürünlerinin MP birikimi ekosistem içinde maruz kaldıkları MP kirliliğinden olabildiği gibi gıda üretim zinciri (işlenme ve paketlenme) boyunca oluşabilecek kontaminasyonlar ve gıdalarla doğrudan temas halinde olan plastik ambalajlarla da olabilmektedir (Jadhav vd., 2021; Jin vd., 2021; Kedzierski vd., 2020; Nalbone vd., 2021). Bu nedenle halk sağlığı açısından paketlenmiş ürünlerde oluşabilecek MP kontaminasyonlarını göz ardı etmemek gerekmektedir.

FAO Balıkçılık ve Su Ürünleri Yetiştiriciliği Teknik Raporunda (Lusher vd., 2017) hem ekoloji hem de su ürünleri güvenliği alanlarında araştırma ihtiyaçlarının mevcut olduğuna, ancak özellikle gıda güvenliğine vurgu yapılarak MP'lerle ilgili araştırma ihtiyaçları şu şekilde sıralanmıştır:

1. Çevrede (su, tortu ve biyota) ve gıdalarda MP'lerin tespiti ve nicelenmesi için analitik yöntemler, özellikle daha küçük ($150\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük) parçacıklara odaklanılarak standartlaştırılmalıdır. Bundan sonra, diyet alımının maruziyet değerlendirmesi için kullanılacak parçacık boyutu da dahil olmak üzere oluşum verileri üretilmelidir.

2. MP'lere ilişkin toksikolojik veriler üretilmeli ve bu süreçte en yaygın polimerler dikkate alınmalıdır. Daha küçük parçacıklar ($150\text{ }\mu\text{m}$ 'den küçük) potansiyel olarak daha tehlikelidir ve bunların incelenmesine öncelik verilmelidir.

3. En yaygın polimerleri içeren MP'lerin su organizmaları ve insanlar için taşınmasına ilişkin daha fazla veri üretilmeli ve MP'lerin balıkçılık, su ürünleri ve insanlar için patojen kaynakları olarak incelenmesi yapılmalıdır.

4. Su ürünlerinin yüksek sıcaklıkta pişirilmesinin veya işlenmesinin MP'lerin potansiyel toksisitesi üzerindeki etkisine ilişkin herhangi bir veri mevcut değildir. MP'lerde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişikliklere ve besin maddeleri ile MP'ler arasındaki kimyasal etkileşimlere ilişkin verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

SONUÇ

Türkiye 4 deniz, 200'e yakın göl, 33 ana nehir ve 800'den fazla barajın bulunduğu, bu kaynaklardaki avlanma ve yetiştiricilik faaliyetleriyle ticari değeri olan kaliteli su ürünlerine sahip bir ülke konumundadır. Ancak Türkiye'deki akuatik ekosistem MP kirliliği, iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik ekseninde kritik bir eşiktir. İklim değişikliği ve kuraklık sebebiyle bazı su kaynaklarında suların çekildiği, küçük iç göllerin kuruma tehlikesiyle karşı karşıya kaldığı aşıkardır. Özellikle kapalı havza özelliği taşıyan Marmara Denizi ve Van Gölü gibi alanlar, atık yönetimi yetersizliği nedeniyle yoğun MP birikimine maruz kalmakta, bu durum sadece sucul ekosistemi değil, besin zinciri yoluyla insan sağlığını da tehdit ederek sürdürülebilir gıda güvenliğini riske atmaktadır. Yükselen sıcaklıklar ve değişen yağış rejimleri, Kızılırmak ve Fırat gibi hayati nehirlerin debilerini düşürürken, bazı sığ göllerde aşırı buharlaşmaya neden olmaktadır. Oluşan su kaybı, tarımsal sulama kapasitesini daraltarak ekonomik sürdürülebilirliği zayıflatmakta ve biyolojik çeşitliliği yok etmektedir. Dolayısıyla, Türkiye'nin su varlığını korumak ve güvenilir su ürünleri kapasitesini artırmak artık sadece bir çevre meselesi değil, iklim krizine dirençli stratejik bir su yönetimi ve "sıfır atık" prensibiyle şekillenen ulusal bir güvenlik meselesi haline gelmiştir.

Sadece ülkemiz değil tüm dünya giderek artan yaygın bir plastik kirliliği ve bu kirlilik kaynaklı gıda güvenliği ve insan sağlığı tehditleriyle karşı karşıyadır. Kendisi küçük olarak atfedilen, ancak etkileri oldukça tehlikeli boyutlarda olan MNP atık sorununu izlemek ve araştırmak için bölgesel ve küresel olarak uluslararası düzeyde ortak çabalar sarf edilmesi gerekmektedir. Su ürünlerindeki MP'lerin insan sağlığı açısından oluşturduğu genel riskler şu anda düşük görünse de, halihazırda çevreye salınan plastiklerin bozunması ve gelecekteki girdiler sonucunda MNP'lerin kaçınılmaz artışı dikkate almak önemlidir. Literatürdeki çalışmalarda bildirilen yüksek yutma oranları göz önüne alındığında, akuatik su ortamlarının MNP kirliliğinden korunmasına yönelik yasal düzenlemeler gereklidir. Dünya genelinde farklı akuatik ekosistemlerde ve farklı su canlılarında yapılan bilimsel araştırmalar ulusal politika yapıcılarına ve yöneticilere su ortamlarındaki MP kirliliğini azaltmak için gerekli verileri sağlasa da yeterli değildir. Alınması gereken önlemlerin belirlenmesi, akuatik ekosistemlerdeki MP kirliliğinin izlenmesi, akuatik gıda ürünleri kaynaklı MP bulaşmasının önlenmesi, MP maruziyetinin su canlıları ve insanlar üzerindeki toksik etkilerinin saptanması için bilim insanları, politikacılar ve toplum birlikte hareket etmeli, ülke bazında ve uluslararası düzeyde yol haritaları belirlenerek uygulanmalıdır. Üretim sürecinde oluşabilecek MP kontaminasyonlarına karşı gerekli önlemler alındıktan sonra, satışa sunulmadan önce belirlenen kalite kontrol standartlarına göre test edilmeli ve MP birikiminin limitler altında olmasına dikkat edilmelidir. Ancak ilgili analizlerin yapılabilmesi için ulusal ve uluslararası mevzuatlarda gerekli regülasyonların düzenlenerek yürürlüğe konması gerekmektedir.

REFERANSLAR

- Abbasi, S., Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., & Hassanaghaei, M. (2018). Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Esuary, Persian Gulf. *Chemosphere*, 205, 80-87.
- Abidli, S., Lahbib, Y., & El Menif, N. (2019). Microplastics in commercial molluscs from the lagoon of Bizerte (Northern Tunisia). *Marine Pollution Bulletin*, 142, 243-252.
- Abidli, S., Pinheiro, M., Lahbib, Y., Neuparth, T., Santos, M.M., & Trigui El Menif, N. (2021). Effects of environmentally revelant levels of polyethylene microplastic on *Mytilus galloprovincialis* (Mollusca, Bivalvia): filtration rate and oxidative stres. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(21), 26643-26652.
- Abo-Al-Ela, H.G., & Faggio, C. (2021). MicroRNA-mediated stress response in bivalve species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111442.
- Akhbarizadeh, R., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2018). Investigating a probable relationship between microplastics and potentially toxic elements in fish muscles from northeast of Persian Gulf. *Environmental Pollution*, 232, 154-163.
- Alnajar, N., Jha, A.N., & Turner, A. (2021). Impacts of microplastic fibres on the marine mussel, *Mytilus galloprovincialis*. *Chemosphere*, 262, 12890.
- Alomar, C., Sureda, A., Capó, X., Guijarro, B., Tejada, S., & Deudero, S. (2017). Microplastic ingestion by *Mullus surmuletus* Linnaeus, 1758 fish and its potential for causing oxidative stress. *Environmental Research*, 159, 135-142.
- Al-Salem, S.M., Uddin, S., & Lyons, B. (2020). Evidence of microplastics (MP) in gut content of major consumed marine fish species in the State of Kuwait (of the Arabian/Persian Gulf). *Marine Pollution Bulletin*, 154, 111052.
- Altunışık, A., Tatlı, H., Doğan, N., Sezen, G., & Parmaksız, A. (2025). Microplastics in the euphrates: assessing contamination in water, sediment, and commercial fish species. *Environmental Pollution*, 126863.
- Alvarez-Ruiz, R., Pico, Y., & Campo, J. (2021). Bioaccumulation of emerging contaminants in mussel (*Mytilus galloprovincialis*): influence of microplastics. *Science of the Total Environment*, 796, 149006.
- Anderson, J.C., Park, B.J., & Palace, V.P. (2016). Microplastics in aquatic environments: implication for Canadian environments. *Environmental Pollution*, 2018, 269-280.
- Andrady, A.L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1596-1605.
- Aras, S., Yakut, Ş.M., & Dulkadiroğlu, H. (2024). The First study on the detection of microplastic in the tissues of *Cyprinus carpio*, *Capoeta tinca* and *Barbus anaticus* in the Kızılırmak River (Nevşehir Region), Türkiye. *Ecohydrology*, 17(8), e2725.

- Ashton, K., Holmes, L., & Turner, A. (2010). Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), 2050-2055.
- Auta, H.S., Emenike, C.U., & Fauziah, S.H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165-176.
- Avio, C.G., Gorbi, S., Milan, M., Benedetti, M., Fattorini, D., d'Errico, G., ... & Regoli, F. (2015). Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution*, 198, 211-222.
- Aytan, U., Esensoy, F.B., Senturk, Y., Arifoğlu, E., Karaoğlu, K., Ceylan, Y., & Valente, A. (2022). Plastic Occurrence in Commercial Fish Species of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 22(SI), TRJFAS20504.
- Aytan, Ü., Koca, Y.Ş., Pasli, S., Güven, O., Ceylan, Y., & Basaran, B. (2025). Microplastics in commercial fish and their habitats in the important fishing ground of the Black Sea: characteristic, concentration, and risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 221, 118434.
- Balcı, S.Z. (2020). Bazı gıdalardaki mikroplastik kirliliğın tespiti. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Barboza, L.G.A., Lopes, C., Oliveira, P., Bessa, F., Otero, V., Henriques, B., ... & Guilhermino, L. (2020). Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Science of the Total Environment*, 717, 134625.
- Barboza, L.G.A., Vethaak, A.D., Lavorante, B.R., Lundebye, A.K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 336-348.
- Barnes, D.K., Galgani, A.F., Thompson, R.C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364, 1985-1998.
- Batel, A., Linti, F., Scherer, M., Erdinger, L., & Braunbeck, T. (2016). Transfer of benzo [a] pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(7), 1656-1666.
- Bayhan, B., & Uncumusaoglu, A.A. (2024). Abundance, characteristics, and potential ecological risks of microplastics in some commercial fish in İzmir Bay (Aegean Sea, Türkiye). *Regional Studies in Marine Science*, 73, 103488.
- Beer, S., Garm, A., Huwer, B., Dierking, J., & Nielsen, T.G. (2018). No increase in marine microplastic concentration over the last three decades—a case study from the Baltic Sea. *Science of the Total Environment*, 621, 1272-1279.

- Beyer, J., Green, N., Brooks, S., Allan, I., Ruus, A., Gomes, T., ... & Schoyen, M. (2017). Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: A review. *Marine Environmental Research*, 130, 338-365.
- Bilgin Fıçıcılar, B., & Aydın, M. (2024). Assessment of microplastic pollution in commercial fish species from the Central Black Sea. Available at SSRN 4876936.
- Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources (Vol 10). Gland, Switzerland: Iucn.
- Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175-9179.
- Browne, M.A., Galloway, T.S., & Thompson, R.C. (2010). Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. *Environmental Science & Technology*, 44, 3404-3409.
- Bulat, F.N., & Kılınç, B. (2020). Plastik ve mikroplastiklerin su canlıları ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(4), 437-443.
- Capó, X., Alomar, C., Compa, M., Sole, M., Sanahuja, I., Soliz Rojas, D.L., Gonz'alez, G.P., Garcinu~no Mart'inez, R.M., & Deudero, S. (2022). Quantification of differential tissue biomarker responses to microplastic ingestion and plasticizer bioaccumulation in aquaculture reared sea bream *Sparus aurata*. *Environmental Research*, 211, 113063.
- Capo, X., Rubio, M., Solomando, A., Alomar, C., Compa, M., Sureda, A., & Deudero, S. (2021). Microplastic intake and enzymatic responses in *Mytilus galloprovincialis* reared at the vicinities of an aquaculture station. *Chemosphere*, 280, 2-11.
- Cappello, T., De-Marco, G., Conti, G.O., Giannetto, A., Ferrante, M., Mauceri, A., & Maisano, M. (2021). Time-dependent metabolic disorders induced by short-term exposure to polystyrene microplastics in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209, 111780.
- Carbery, M., O'Connor, W., & Palanisami, T. (2018). Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment International*, 115, 400-409.
- Catarino, A.I., Macchia, V., Sanderson, W.G., Thompson, R.C., & Henry, B.T. (2018). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution*, 237, 675-684.
- Chan, H.S.H., Dingle, C., & Not, C. (2019). Evidence for non-selective ingestion of microplastic in demersal fish. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110523.
- Cheung, L.T., Lui, C.Y., & Fok, L. (2018). Microplastic contamination of wild and captive flathead grey mullet (*Mugil cephalus*). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 597.
- Chubarenko, I.P., Esiukova, E.E., Bagaev, A.V., Bagaeva, M.A., & Grave, A.N. (2018). Three dimensional distribution of anthropogenic microparticles in the body of

- sandy beaches of a non-tidal sea and its oceanographic causes. *Science of the Total Environment*, 628, 1340-1351.
- Chubarenkoa, I., Esiukovaa, E., Khatmullinaa, L., Lobchuka, O., Gravea, A., Kilesob, A., & Hasel, M. (2020). From macro to micro, from patchy to uniform: analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111198.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T.S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine pollution bulletin*, 62(12), 2588-2597.
- Constant, M., Ludwig, W., Kerherve, P., Sola, J., Charriere, B., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., & Heussner, S. (2020). Microplastic fluxes in a large and a small Mediterranean river catchments: the Tet and the Rhone, Northwestern Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 716, 136984.
- Cózar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., ... & Duarte, C. M. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28), 10239-10244.
- Dauvergne, P. (2018). The power of environmental norms: marine plastic pollution and the politics of microbeads. *Environmental Politics*, 27(4), 579-597.
- Dehaut, A., Cassone, A.L., Frère, L., Hermabessiere, L., Himber, C., Rinnert, E., ... & Paul-Pont, I. (2016). Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization. *Environmental Pollution*, 215, 223-233.
- Desforges, J.P.W., Galbraith, M., Dangerfield, N., & Ross, P.S. (2014). Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1), 94-99.
- Ding, Y., Zou, X., Wang, C., Feng, Z., Wang, Y., Fan, Q., & Chen, H. (2021). The abundance and characteristics of atmospheric microplastic deposition in the northwestern South China Sea in the fall. *Atmospheric Environment*, 253, 118389.
- Doyle, M.J., Watson, W., Bowlin, N.M., & Sheavly, S.B. (2011). Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific ocean. *Marine Environmental Research*, 71, 41e52.
- EFSA (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM)). *EFSA Journal*, 14(6), e04501.
- EFSA (2025). Microplastics: European Parliament requests scientific advice from EFSA. *European Food Safety Authority News*. <https://www.efsa.europa.eu/en/news/microplastics-european-parliament-requests-scientific-advice-efsa> (Erişim tarihi: 12.12.2015).
- Erdoğan, Ş. (2025). Microplastic contamination in freshwater fish: first insights from Gelingüllü Reservoir (Türkiye). *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(6), 1-14.
- Eriksen, M., Lebreton, L.C.M., Carson, H.S., Thiel, M., Moore, C.J., Borerro, J.C., Galgani, F., Ryan, P.G., & Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans:

more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS One*, 9, e111913.

- Eryaşar, A.R., Mutlu, T., Karaoğlu, K., Veske, E., & Gedik, K. (2024). Assessment of microplastic pollution in eleven commercial fish species in the Gulf of İzmir (Aegean Sea, eastern Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, 208, 116932.
- European Commision (2000). Water Framework Directive (2000/60/EC). The European Parliament and the Council of the European Union, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060> (Erişim tarihi: 12.12.2025).
- European Commission (2010). Commission decision of 1 September 2010 on criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters. (2010/ 477/EU). *Off. J. Eur. Union* L 232/14.
- FAO (2020). Cultured Aquatic Species Fact Sheets. In: FAO Fisheries and Aquaculture Division. <https://www.fao.org/fishery/en/culturedspecies/search> (Erişim tarihi: 12.12.2025).
- Feng, Z., Zhang, T., Shi, H., Gao, K., Huang, W., Xu, J., Wang, J., Wang, R., Li, J., & Gao, G. (2020b). Microplastics in bloom-forming macroalgae: distribution, characteristics and impacts. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122752.
- Feng, Z., Zhang, T., Wang, J., Huang, W., Wang, R., Xu, J., Fu, G., & Gao, G. (2020a). Spatio-temporal features of microplastics pollution in macroalgae growing in an important mariculture area, China. *Science of the Total Environment*, 719, 137490.
- Ferreira, P., Fonte, E., Soares, M.E., Carvalho, F., & Guilhermino, L. (2016). Effects of multi-stressors on juveniles of the marine fish *Pomatoschistus microps*: gold nanoparticles, microplastics and temperature. *Aquatic Toxicology*, 170, 89-103.
- Fischer, V., Elsner, N.O., Brenke, N., Schwabe, E., & Brandt, A. (2015). Plastic pollution of the Kuril–Kamchatka Trench area (NW pacific). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 111, 399-405.
- Fossi, M.C., Panti, C., Baini, M., & Lavers, J.L. (2018). A review of plastic associated pressures: cetaceans of the Mediterranean sea and eastern Australian shearwaters as case studies. *Frontiers in Marine Science*, 5, 173.
- Fossi, M.C., Pedà, C., Compà, M., Tsangaris, C., Alomar, C., Claro, F., ... & Baini, M. (2018). Bioindicators for monitoring marine litter ingestion and its impacts on Mediterranean biodiversity. *Environmental Pollution*, 237, 1023-1040.
- Gao, G., Zhao, X., Jin, P., Gao, K., & Beardall, J. (2021). Current understanding and challenges for aquatic primary producers in a world with rising micro-and nano-plastic levels. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124685.
- Garcia, A.G., Suárez, D.C., Li, J., & Rotchell, J.M. (2021). A comparison of microplastic contamination in freshwater fish from natural and farmed sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14488-14497.
- Garcia, T.D., Cardozo, A.L., Quirino, B.A., Yofukuji, K.Y., Ganassin, M.J., dos Santos,

- N.C., & Fugi, R. (2020). Ingestion of microplastic by fish of different feeding habits in urbanized and non-urbanized streams in Southern Brazil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(8), 434.
- Gedik, K., Mutlu, T., Eryaşar, A.R., Bayçelebi, E., & Turan, D. (2024). Long-term investigation of microplastic abundance in *Squalius* species in Turkish inland waters. *Environmental Pollution*, 343, 123278.
- GESAMP (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. In: Kershaw, P.J. (Ed.), (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environment Protection). Reports and Studies GESAMP, No. 90 (96 p).
- GESAMP (2019). Guidelines or the Monitoring and Assessment of Plastic Litter and Microplastics in the Ocean. (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of MarineEnvironmental Protection).
- Gove, J.M., Whitney, J.L., McManus, M.A., Lecky, J., Carvalho, F.C., Lynch, J.M., ... & Williams, G.J. (2019). Prey-size plastics are invading larval fish nurseries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(48), 24143-24149.
- Granby, K., Rainieri, S., Rasmussen, R.R., Kotterman, M.J.J., Sloth, J.J., Cederberg, T.L., Barranco, A., Marques, A., & Larsen, B.K. (2018). The influence of microplastics and halogenated contaminants in feed on toxicokinetics and gene expression in European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Environmental Research*,164, 430-443.
- Gündoğdu, S., Çevik, C., & Ataş, N.T. (2020). Stuffed with microplastics: microplastic occurence in traditional stuffed mussels sold in the Turkish market. *Food Bioscience*, 37, 100715.
- Gündoğdu, S., Çevik, C., Güzel, E., & Kilercioğlu, S. (2018). Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11), 626.
- Guzzetti, E., Sureda, A., Tejada, S., & Faggio, C. (2018). Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 64, 164-171.
- Habib, R.Z., Thiemann, T., & Al Kendi, R. (2020). Microplastics and wastewater treatment plants—a review. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(01), 1.
- Hacısalıhoğlu, S. (2025). A hazard index of microplastics contamination in commercial marine fish species and mussels in the Southern Marmara Sea, Turkey. *Aquaculture Research*, 2025(1), 6690338.
- Hall, N.M., Berry, K.L.E., Rintoul, L., & Hoogenboom, M.O. (2015). Microplastic ingestion by scleractinian corals. *Marine Biology*, 162(3), 725-732.
- Hanachi, P., Karbalaeei, S., & Yu, S. (2021). Combined polystyrene microplastics and

chlorpyrifos decrease levels of nutritional parameters in muscle of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Environmental Science and Pollution Research, 28(45), 64908-64920.

- Hanachi, P., Karbalaeei, S., Walker, T.R., Cole, M., & Hosseini, S.V. (2019). Abundance and properties of microplastics found in commercial fish meal and cultured common carp (*Cyprinus carpio*). Environmental Science and Pollution Research, 26, 23777-23787.
- Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P., & Duflos, G. (2017). Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: a review. Chemosphere, 182, 781-793.
- Herrera, A., Acosta-Dacal, A., Luzardo, O.P., Martínez, I., Rapp, J., Reinold, S., ... & Gómez, M. (2022). Bioaccumulation of additives and chemical contaminants from environmental microplastics in European seabass (*Dicentrarchus labrax*). Science of the Total Environment, 822, 153396.
- Ivleva, N.P., Wiesheu, A.C., & Niessner, R. (2017). Microplastic in aquatic ecosystems. Angewandte Chemie International Edition, 56(7), 1720-1739.
- Jadhav, E., Sankhla, M., Bhat, R., & Bhagat, D. (2021). Microplastics from food packaging: An overview of human consumption, health threats, and alternative solutions. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 16, 100608.
- James, K., Vassant, K., Padua, S., Gopinath, V., Abilash, K.S., Jeyabaskaran, R., ... & John, S. (2020). An assessment of microplastics in the ecosystem and selected commercially important fishes off Kochi, south eastern Arabian Sea, India. Marine Pollution Bulletin, 154, 111027.
- Jeong, J., & Choi, J. (2019). Adverse outcome pathways potentially related to hazard identification of microplastics based on toxicity mechanisms. Chemosphere, 231, 249-255.
- Jin, M., Wang, X., Ren, T., Wang, J., & Shan, J. (2021). Microplastics contamination in food and beverages: Direct exposure to humans. Concise Reviews & Hypotheses in Food Science, 86(7), 2816-2837.
- Kaba, M.O., Minaz, M., Kaya, C., Jouy, T., Kurtul, I., & Aytan, Ü. (2025). Silent invaders of freshwater ecosystems: unveiling the microplastic crisis threatening the world's largest soda lake (Lake Van, Türkiye). Journal of Great Lakes Research, 102604.
- Kang, H.J., Park, H.J., Kwon, O.K., Lee, W.S., Jeong, D.H., Ju, B.K., & Kwon, J.H. (2018). Occurrence of microplastics in municipal sewage treatment plants: a review. Environmental Health and Toxicology, 33(3), e2018013.
- Karami, A., Golieskardi, A., Choo, C.K., Larat, V., Karbalaeei, S., & Salamatinia, B. (2018). Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats. Science of the Total Environment, 612, 1380-1386.
- Karami, A., Golieskardi, A., Choo, C.K., Romano, N., Ho, Y.B., & Salamatinia, B. (2017).

- A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish. *Science of the Total Environment*, 578, 485-494.
- Karbalaei, S., Golieskardi, A., Hamzah, H.B., Abdulwahid, S., Hanachi, P., Walker, T.R., & Karami, A. (2019). Abundance and characteristics of microplastics in commercial marine fish from Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 148, 5-15.
- Karbalaei, S., Hanachi, P., Rafiee, G., Seifori, P., & Walker, T.R. (2021). Toxicity of polystyrene microplastics on juvenile *Oncorhynchus mykiss* (rainbow trout) after individual and combined exposure with chlorpyrifos. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123980.
- Karlsson, T.M., Vethaak, A.D., Almroth, B.C., Ariese, F., van Velzen, M., Hassellöv, M., & Leslie, H.A. (2017). Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: Method development and microplastic accumulation. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 403-408.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzard, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489.
- Khan, F.R., Shashoua, Y., Crawford, A., Drury, A., Sheppard, K., Stewart, K., & Scult-horp, T. (2020). "The plastic Nile": first evidence of microplastic contamination in fish from the Nile river (Cairo, Egypt). *Toxics*, 8(2), 22.
- Kılıç, E. (2022). Microplastic ingestion evidence by economically important farmed fish species from Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 114097.
- Kılıç, E., & Yücel, N. (2022). Microplastic occurrence in the gastrointestinal tract and gill of bioindicator fish species in the northeastern Mediterranean. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113556.
- Kılıç, E., Yücel, N., & Şahutoğlu, S.M. (2022). First record of microplastic occurrence at the commercial fish from Orontes River. *Environmental Pollution*, 307, 119576.
- Kırkan, S. (2020). İzmir Körfezi'nde bazı pelajik balık türlerinde mikroplastik alımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, İzmir.
- Klangnurak, W., & Chunniyom, S. (2020). Screening for microplastics in marine fish of Thailand: the accumulation of microplastics in the gastrointestinal tract of different foraging preferences. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), 27161-27168.
- Koelmans, A.A., Besseling, E., Foekema, E., Kooi, M., Mintenig, S., Ossendrop, B.C., ... & Scheffer, M. (2017). Risks of plastic debris: unravelling fact, opinion, perception, and belief. *Environmental Science and Technology*, 51(20), 11513-11519.
- Koraltan, İ., Mavruk, S., & Güven, O. (2022). Effect of biological and environmental factors on microplastic ingestion of commercial fish species. *Chemosphere*, 303, 135101.
- Kühn, S., & Van Franeker, J.A. (2020). Quantitative overview of marine debris ingested

by marine megafauna. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110858.

- Kurtul, I., Eryaşar, A., Mutlu, T., Parker, B., Kaya, C., Bayçelebi, E., ... & Gedik, K. (2025). Microplastic ingestion in invasive mosquitofish (*Gambusia holbrooki*): a nationwide survey from Türkiye. *Environmental Sciences Europe*. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01276-6>
- Kurtul, I., Parker, B., Bayçelebi, E., Oral Kaba, M., Kaya, C., Mutlu, T., ... & Britton, J.R. (2025). Historically low microplastic loads within white bream (*Blicca bjoerkna*) in the Marmara basin, Türkiye. *Journal of Fish Biology*. <https://doi.org/10.1111/jfb.70076>
- Kuśmerek, N., & Popiołek, M. (2020). Microplastics in freshwater fish from Central European lowland river (Widawa R., SW Poland). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(10), 11438-11442.
- Lam, T.W.L., Fok, L., Lin, L., Xie, Q., Li, H.X., Xu, X.R., & Yeung, L.C. (2020). Spatial variation of floatable plastic debris and microplastics in the Pearl River Estuary, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111383.
- Lam, T.W.L., Fok, L., Ma, A.T.H., Li, H.X., Xu, X.R., Cheung, L.T.O., & Wong, M.H. (2022). Microplastic contamination in marine-cultured fish from the Pearl River Estuary, South China. *Science of the Total Environment*, 827, 154281.
- Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpää, M., & Sillanpää, M. (2019). Intercomparison study on commonly used methods to determine microplastics in wastewater and sludge samples. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 12109-12122.
- Lattin, G.L., Moore, C.J., Zellers, A.F., Moore, S.L., & Weisberg, S.B. (2004). A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore. *Marine Pollution Bulletin*, 49, 291-294.
- Law, K.L., & Thompson, R.C. (2014). Microplastics in the seas. *Science*, 345(6193), 144-145.
- Leslie, H.A., Van Velzen, M.J., 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.
- Li, H.X., Ma, L.S., Lin, L., Ni, Z.X., Xu, X.R., Shi, H.H., Yan, Y., Zheng, G.M., & Rittschof, D. (2018). Microplastics in oysters *Saccostrea cucullata* along the Pearl River estuary, China. *Environmental Pollution*, 236, 619-625.
- Li, J., Lusher, A.L., Rotchell, J.M., Deudero, S., Turra, A., Brate, I.N., ... & Shi, H. (2019). Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution. *Environmental Pollution*, 244, 522-533.
- Li, J., Qu, X., Su, L., Zhang, W., Yang, D., Kolandhasamy, P., ... & Shi, H. (2016). Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environmental Pollution*, 214, 177-184.
- Lin, L., Ma, L.S., Li, H.X., Pan, Y.F., Liu, S., Zhang, L., Peng, J.P., Fok, L., Xu, X.R., & He, W.H. (2020). Low level of microplastic contamination in wild fish from an urban estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111650.

- Lithner, D., Larsson, Å., & Dave, G. (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of the Total Environment*, 409(18), 3309-3324.
- Lusher, A.Á., Welden, N.A., Sobral, P., & Cole, M. (2020). Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. In *Analysis of nanoplastics and microplastics in food* (pp. 119-148). CRC Press.
- Lusher, A.L., Hollman, P.C.H., & Mendoza-Hill, J.J. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 615. Rome, Italy. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a9a298e0-9db6-4769-beac-37325be3e280/content> (Erişim tarihi: 12.12.2015).
- Lusher, A.L., Mchugh, M., & Thompson, R.C. (2013). Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Marine Pollution Bulletin*, 67(1-2), 94-99.
- Macieira, R.M., Oliveira, L.A.S., Cardozo-Ferreira, G.C., Pimentel, C.R., Andrades, R., Gasparini, J.L., ... & Giarrizzo, T. (2021). Microplastic and artificial cellulose microfibers ingestion by reef fishes in the Guarapari Islands, southwestern Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 167, 112371.
- Mak, C.W., Yeung, K.C.F., & Chan, K.M. (2019). Acute toxic effects of polyethylene microplastic on adult zebrafish. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109442.
- Matluba, M., Ahmed, M.K., Chowdhury, K.A., Khan, N., Ashiq, M.A.R., & Islam, M.S. (2023). The pervasiveness of microplastic contamination in the gastrointestinal tract of fish from the western coast of Bangladesh. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115145.
- McNeish, R., Kim, L., Barrett, H., Mason, S., Kelly, J., & Hoellein, T. (2018). Microplastic in riverine fish is connected to species traits. *Scientific Reports*, 8(1), 11639.
- Merga, L.B., Redondo-Hasselerharm, P.E., Van den Brink, P.J., & Koelmans, A.A. (2020). Distribution of microplastic and small macroplastic particles across four fish species and sediment in an African lake. *Science of the Total Environment*, 741, 140527.
- Miloloža, M., Kučić Grgić, D., Bolanča, T., Ukić, Š., Cvetnić, M., Ocelić Bulatović, V., ... & Kušić, H. (2020). Ecotoxicological assessment of microplastics in freshwater sources—A review. *Water*, 13(1), 56.
- Mizraji, R., Ahrendt, C., Perez-Venegas, D., Vargas, J., Pulgar, J., Aldana, M., ... & Galbán-Malagón, C. (2017). Is the feeding type related with the content of microplastics in intertidal fish gut?. *Marine Pollution Bulletin*, 116(1-2), 498-500.
- Mohamed Nor, N.H., Kooi, M., Diepens, N.J., & Koelmans, A.A. (2021). Lifetime accumulation of microplastic in children and adults. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5084-5096.

- Moore, C.J. (2008). Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, 108(2), 131-139.
- Morais, L.M.S., Sarti, F., Chelazzi, D., Cincinelli, A., Giarrizzo, T., & Martinelli Filho, J.E. (2020). The sea anemone *Bunodosoma cangicum* as a potential biomonitor for microplastics contamination on the Brazilian Amazon coast. *Environmental Pollution*, 265, 114817.
- Nalbone, L., Cincotta, 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.
- Nan, B., Su, L., Kellar, C., Craig, N.J., Keough, M.J., & Pettigrove, V. (2020). Identification of microplastics in surface water and Australian freshwater shrimp *Paratya australiensis* in Victoria, Australia. *Environmental Pollution*, 259, 113865.
- Napper, I.E., Davies, B.F., Clifford, H., Elvin, S., Koldewey, H.J., Mayewski, P.A., Miner, K.R., Potocki, M., Elmora, C.A., Gajurel, A.P., & Thompson, R.C. (2020). Reaching new heights in plastic pollution—preliminary findings of microplastics on Mount Everest. *One Earth*, 3(5), 621-630.
- Naylor, R.L., Hardy, R.W., Buschmann, A.H., Bush, S.R., Cao, L., Klinger, D.H., Little, D.C., Lubchenco, J., Shumway, S.E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), 551-563.
- Neves, D., Sobral, P., Ferreira, J.L., & Pereira, T. (2015). Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1), 119-126.
- Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science and Technology*, 50(20), 10777-11077.
- Oliveira, M., Ribeiro, A., Hylland, K., & Guilhermino, L. (2013). Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae). *Ecological Indicators*, 34, 641-647.
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., & Wang, C. (2020). Removal of microplastics from the environment. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 807-828.
- Park, T.J., Kim, M.K., Lee, S.H., Lee, Y.S., Kim, M.J., Song, H.Y., ... & Zoh, K.D. (2022). Occurrence and characteristics of microplastics in fish of the Han River, South Korea: Factors affecting microplastic abundance in fish. *Environmental Research*, 206, 112647.
- Park, T.J., Lee, S.H., Lee, M.S., Lee, J.K., Lee, S.H., & Zoh, K.D. (2020b). Occurrence of microplastics in the Han River and riverine fish in South Korea. *Science of the Total Environment*, 708, 134535.
- Park, T.J., Lee, S.H., Lee, M.S., Lee, J.K., Park, J.H., & Zoh, K.D. (2020a). Distributions of microplastics in surface water, fish, and sediment in the vicinity of a sewage

- treatment plant. *Water*, 12(12), 3333.
- Parvin, F., Jannat, S., & Tareq, S.M. (2021). Abundance, characteristics and variation of microplastics in different freshwater fish species from Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 784, 147137.
- Patria, M.P., Santoso, C.A., & Tsabita, N. (2020). Microplastic ingestion by periwinkle snail *Littoraria scabra* and mangrove crab *Metopograpsus quadridentata* in Pramuka Island, Jakarta Bay, Indonesia. *Sains Malaysiana*, 49(9), 2151-2158.
- Peda, C., Caccamo, L., Fossi, M.C., Gai, F., Andaloro, F., Genovese, L., ... & Maricchiolo, G. (2016). Intestinal alterations in European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758) exposed to microplastics: preliminary results. *Environmental Pollution*, 212, 251-256.
- Pegado, T., Brabo, L., Schmid, K., Sarti, F., Gava, T.T., Nunes, J., ... & Giarrizzo, T. (2021). Ingestion of microplastics by hypanus guttatus stingrays in the Western Atlantic Ocean (Brazilian Amazon Coast). *Marine Pollution Bulletin*, 162, 111799.
- Peng, X., Chen, M., Chen, S., Dasgupta, S., Xu, H., Ta, K., ... & Bai, S. (2018). Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochemical Perspectives Letters*, 9(1), 1-5.
- Perumal, K., & Muthuramalingam, S. (2021). Global sources, abundance, size, and distribution of microplastics in marine sediments-a critical review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 264, 107702.
- Peters, C.A., Thomas, P.A., Rieper, K.B., & Bratton, S.P. (2017). Foraging preferences influence microplastic ingestion by six marine fish species from the Texas Gulf Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 124(1), 82-88.
- Pojar, I., Stănică, A., Stock, F., Kochleus, C., Schultz, M., & Bradley, C. (2021). Sedimentary microplastic concentrations from the Romanian Danube River to the Black Sea. *Scientific Reports*, 11(1), 2000.
- Prata, J.C., Da Costa, J.P., Lopes, I., Duarte, A.C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455.
- Prinz, N., & Korez, Š. (2020). Understanding how microplastics affect marine biota on the cellular level is important for assessing ecosystem function: a review. *YOUMaRES*, 9, 101-120.
- Prokić, M.D., Radovanović, T.B., Gavrić, J.P., & Faggio, C. (2019). Ecotoxicological effects of microplastics: Examination of biomarkers, current state and future perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 111, 37-46.
- Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R.H. (2020). The plastic brain: neurotoxicity of micro-and nanoplastics. *Particle and Fibre Toxicology*, 17(1), 24.
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta. *Environmental International*, 146, 106274.

- Reinold, S., Herrera, A., Saliu, F., Hernández-González, C., Martinez, I., Lasagni, M., & Gómez, M. (2021). Evidence of microplastic ingestion by cultured European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112450.
- Renzi, M., Guerranti, C., & Blaskovic, A. (2018). Microplastic contents from maricultured and natural mussels. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 248-251.
- Rezania, S., Park, J., Din, M.F.M., Taib, S.M., Talaiekhosani, A., Yadav, K.K., & Kamyab, H. (2018). Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: a review of recent studies. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 191-208.
- Rios, L.M., Moore, C., & Jones, P.R. (2007). Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Marine Pollution Bulletin*, 54(8), 1230-1237.
- Rios-Fuster, B., Arechavala-Lopez, P., García-Marcos, K., Alomar, C., Compa, M., Álvarez, E., ... & Deudero, S. (2021). Experimental evidence of physiological and behavioral effects of microplastic ingestion in *Sparus aurata*. *Aquatic Toxicology*, 231, 105737.
- Rochman, C.M. (2018). Microplastics research – from sink to source. *Science*, 360(6384), 28-29.
- Romeo, T., Pietro, B., Pedà, C., Consoli, P., Andaloro, F., & Fossi, M.C. (2015). First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 95(1), 358-361.
- Ryan, P.G., Moore, C.J., Van Franeker, J.A., & Moloney, C.L. (2009). Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1999-2012.
- Saeed, T., Al-Jandal, N., Al-Mutairi, A., & Taqi, H. (2020). Microplastics in Kuwait marine environment: Results of first survey. *Marine Pollution Bulletin*, 152, 110880.
- SAPEA (2019). Science Advice for Policy by European Academies (SAPEA): A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society, Berlin.
- Savoca, S., Matanović, K., D'Angelo, G., Vetri, V., Anselmo, S., Bottari, T., ... & Gjurčević, E. (2021). Ingestion of plastic and non-plastic microfibers by farmed gilt-head sea bream (*Sparus aurata*) and common carp (*Cyprinus carpio*) at different life stages. *Science of the Total Environment*, 782, 146851.
- Scherer, C., Weber, A., Lambert, S., & Wagner, M. (2018). Interactions of microplastics with freshwater biota *Freshwater Microplastics*, 58, 303.
- Schmid, K., Winemiller, K.O., Chelazzi, D., Cincinelli, A., Dei, L., & Giarrizzo, T. (2018). First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 814-821.
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019). Detection of various microplastics in human stool: a prospective case series. *Annals of Internal Medicine*, 171(7), 453-457.
- SDÇEP (2019). Samsun İli Deniz Çöpleri Eylem Planı. SDÇEP (2019-2023). Çev-

- re ve Şehircilik Bakanlığı, Samsun Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/samsun-_eylem_plani_2019_son-1-20210617133748.pdf (Erişim tarihi: 12.12.2025).
- Selden, K.R., & Baker, M.R. (2023). Influence of marine habitat on microplastic prevalence in forage fish and salmon in the Salish Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 197, 115748.
- Silva-Cavalcanti, J.S., Silva, J.D.B., de França, E.J., de Araújo, M.C.B., & Gusmao, F. (2017). Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource. *Environmental Pollution*, 221, 218-226.
- Şimşek, A. (2025). Determination of microplastic pollution in commercial fish in the Middle Black Sea (Samsun), Türkiye. *Toxics*, 13(10), 865.
- 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.
- Solomando, A., Capó, X., Alomar, C., Compa, M., Valencia, J.M., Sureda, A., & Deudero, S. (2021). Assessment of the effect of long-term exposure to microplastics and depuration period in *Sparus aurata* Linnaeus, 1758: Liver and blood biomarkers. *Science of the Total Environment*, 786, 147479.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., Van Loosdrecht, M.C., & Ni, B.J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21-37.
- Sun, X., Liang, J., Zhu, M., Zhao, Y., & Zhang, B. (2018). Microplastics in seawater and zooplankton from the Yellow Sea. *Environmental Pollution*, 242, 585-595.
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. (2017). Solutions to microplastic pollution—Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research*, 123, 401-407.
- Tekman, M.B., Gutow, L., Macario, A., Haas, A., Walter, A., & Bergmann, M. (2017). Interactions between aquatic life and marine litter. Alfred Wegener Institut Helmholtz Zentrum für Polar und Meeresforschung. Litterbase. https://litterbase.awi.de/interaction_detail (Erişim tarihi: 12.12.2025).
- Temiz, F. (2023). Akdeniz midyesinde (*Mytilus galloprovincialis*) mikroplastik kirliliğinin araştırılması: Taze, işlenmiş ve pişirilmiş midyelerin karşılaştırılması ve halk sağlığına etkilerinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji A.B.D., Muğla.
- Tepe, Y., Aydın, H., Ustaoglu, F., & Kodat, M. (2024). Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tracts of four most consumed fish species in Giresun, the Southeastern Black Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(43), 55336-55345.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W., ... & Russell, A.E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic?. *Science*, 304(5672), 838-838.

- Tien, C.J., Wang, Z.X., & Chen, C.S. (2020). Microplastics in water, sediment and fish from the Fengshan River system: Relationship to aquatic factors and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by fish. *Environmental Pollution*, 265, 114962.
- Turanlı, N. (2022). Türkiye kıyı suları boyunca Akdeniz midyesinde (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819) ağır metal seviyelerinin izlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Su Ürünleri Anabilim Dalı, Rize.
- US EPA (2001). Risk Assessment guidance for superfund: volume III-part a. Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment. Unites States Environmental Protection Agency Washington.
- Van Sebillie, E., Aliani, S., Law, K.L., Maximenko, N., Alsina, J.M., Bagaev, A., ... & Wichmann, D. (2020). The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Environmental Research Letters*, 15(2), 023003.
- Von Moos, N., Burkhardt-Holm, P., & Köhler, A. (2012). Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environmental Science & Technology*, 46(20), 11327-11335.
- Vroom, R.J., Koelmans, A.A., Besseling, E., & Halsband, C. (2017). Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton. *Environmental Pollution*, 231, 987-996.
- Walkinshaw, C., Lindeque, P.K., Thompson, R., Tolhurst, T., & Cole, M. (2020). Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110066.
- Wang, Q., Li, J., Zhu, X., Sun, C., Teng, J., Chen, L., ... & Zhao, J. (2022). Microplastics in fish meals: An exposure route for aquaculture animals. *Science of the Total Environment*, 807, 151049.
- Wang, S., Zhang, C., Pan, Z., Sun, D., Zhou, A., Xie, S., ... & Zou, J. (2020). Microplastics in wild freshwater fish of different feeding habits from Beijiing and Pearl River Delta regions, south China. *Chemosphere*, 258, 127345.
- Waring, R.H., Harris, R.M., & Mitchell, S.C. (2018). Plastic contamination of the food chain: a threat to human health?. *Maturitas*, 115, 64-68.
- WHO (2019). Microplastics in drinking-water. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/326499/9789241516198-eng.pdf> (Erişim tarihi: 12.12.2015).
- WHO (2022). Dietary and inhalation exposure to nano-and microplastic particles and potential implications for human health. World Health Organization. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/362049/9789240054608-eng.pdf> (Erişim tarihi: 12.12.2025).
- Wright, S.L., & Kelly, F.J. (2017). Plastic and human health: a micro issue?. *Environmental Science and Technology*, 51(12), 6634-6647.
- Wu, F., Wang, Y., Leung, J. Y., Huang, W., Zeng, J., Tang, Y., ... & Cao, L. (2020). Accumulation of microplastics in typical commercial aquatic species: a case study at

- a productive aquaculture site in China. *Science of the Total Environment*, 708, 135432.
- Xanthos, D., & Walker, T.R. (2017). International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): a review. *Marine Pollution Bulletin*, 118(1-2), 17-26.
- Yong, C.Q.Y., Valiyaveetil, S., & Tang, B.L. (2020). Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(05), 1509.
- Yozukmaz, A. (2021). Investigation of microplastics in edible wild mussels from Izmir Bay (Aegean Sea, Western Turkey): a risk assessment for the consumers. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112733.
- Yücedağ, E., Mülayim, A., & Gündüz, S.K. (2024). Concentration and Characterisation with spectroscopic technique of microplastics in the surface sediment and commercial fish species of Gemlik Bay (Marmara Sea). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(8), TRJFAS25858.
- Zakeri, M., Naji, A., Akbarzadeh, A., & Uddin, S. (2020). Microplastic ingestion in important commercial fish in the southern Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111598.
- Zeytin, S., Wagner, G., Mackay-Roberts, N., Gerdt, G., Schuirmann, E., Klockmann, S., & Slater, M. (2020). Quantifying microplastic translocation from feed to the fillet in European sea bass *Dicentrarchus labrax*. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111210.
- Zhang, C., Wang, S., Pan, Z., Sun, D., Xie, S., Zhou, A., ... & Zou, J. (2020). Occurrence and distribution of microplastics in commercial fishes from estuarine areas of Guangdong, South China. *Chemosphere*, 260, 127656.
- Zhang, L., Xie, Y., Zhong, S., Liu, J., Qin, Y., & Gao, P. (2021). Microplastics in freshwater and wild fishes from Lijiang River in Guangxi, Southwest China. *Science of the Total Environment*, 755, 142428.
- Zhu, J., Zhang, Q., Li, Y., Tan, S., Kang, Z., Yu, X., ... & Shi, H. (2019). Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China. *Science of the Total Environment*, 658, 62-68.
- Zobkov, M., & Esiukova, E. (2017). Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results. *Marine Pollution Bulletin*, 114(2), 724-732.



GIDA AMBALAJ MATERYALİ OLARAK NANOLİF ÜRETİMİ İÇİN ÇÖZELTİ ÜFLEMELİ EĞİRME SİSTEMLERİ VE ALTERNATİF CİHAZLAR

“ ”

Tuğba Güngör Ertuğral¹

¹ Doç. Dr., Çanakkale Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye. Orcid: 0000-0002-1306-3399, tugbagungor@comu.edu.tr

Çözelti üflemleri eğirme, yüksek basınçlı gaz kullanarak eğirme çözeltisini nanoliflere dönüştüren bir teknolojidir. Yüksek üretim verimliliği ve kolay kullanım avantajları gösterebilmektedir. Bu teknikle hazırlanan nanolifler sırasıyla,

1. Geniş özgül yüzey alanına
2. Yüksek gözenekliliğe
3. Esnek yüzey fonksiyonelleştirmesine sahiptir.

Çözelti üflemleri eğirme teknolojisi gıda alanında giderek ilgi görmektedir. Gıda alanında bakteriyostatik gıda ambalajı, yavaş salınımlı gıda ambalajı ve akıllı sensörler gibi çözelti üflemleri eğirme yöntemiyle üretilen nanolif uygulama alanları mevcuttur (Li vd., 2024) .

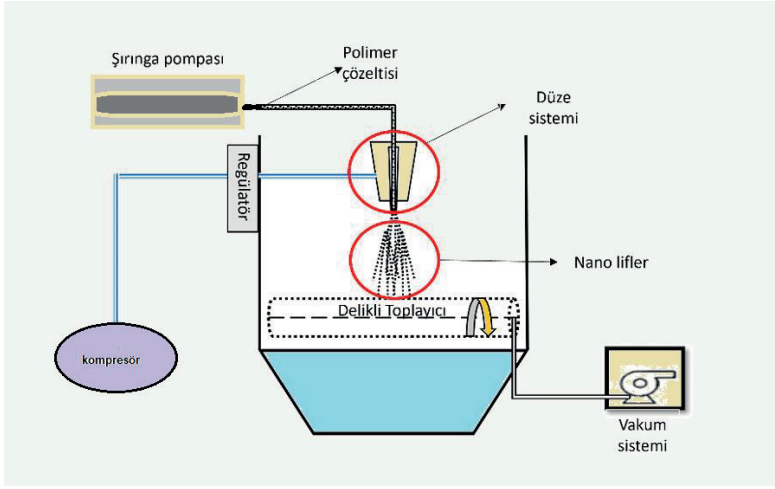
Çözelti üflemleri eğirme sistemi “Solution blow spinning” (SBS) genel olarak endüstride kullanılan bir yöntemdir. Sentetik elyaf üretiminde 19. yüzyılın sonlarından itibaren kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Çözelti üflemleri eğirme sistemi ıslak eğirme ve kuru eğirme olmak üzere iki tipte üretilir. Her iki yöntemde de, akışkan bir polimer çözeltisi, iplikçik meme ucu ince deliğinden geçerek elyaf meydana getirir. Bu işlem sırasında çözücü uzaklaştırılır ve elyaflar mekanik anlamda çekilerek elde edilir.

Kuru eğirme

Kuru eğirme yönteminde polimer çözeltisi bir iplikcik memesinden, polimerin çözücünün buharlaşmasıyla katılaştığı, eğirme kulesi kolona itilir (Nakajima, 1994).

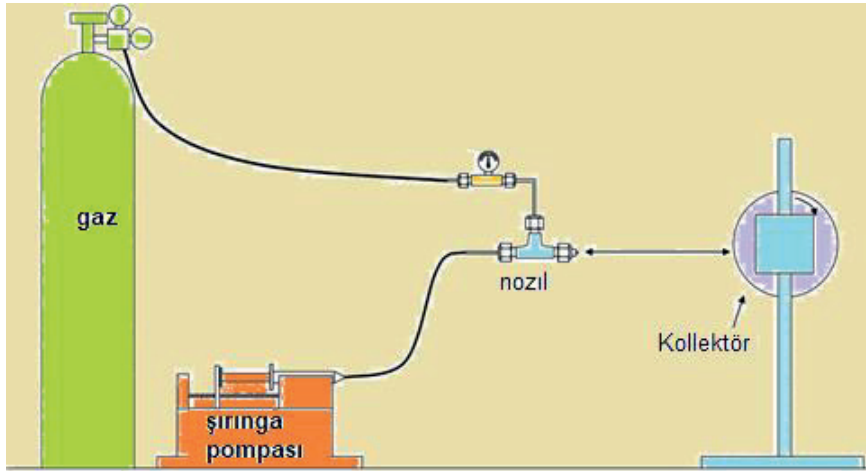
Islak eğirme

Bu yöntemde iplikçik memesinin içine polimerin seyreltme veya kimyasal reaksiyon yoluyla çökeldiği ve elyaf oluşturduğu bir kimyasal banyo yerleştirilir (Nakajima, 1994).

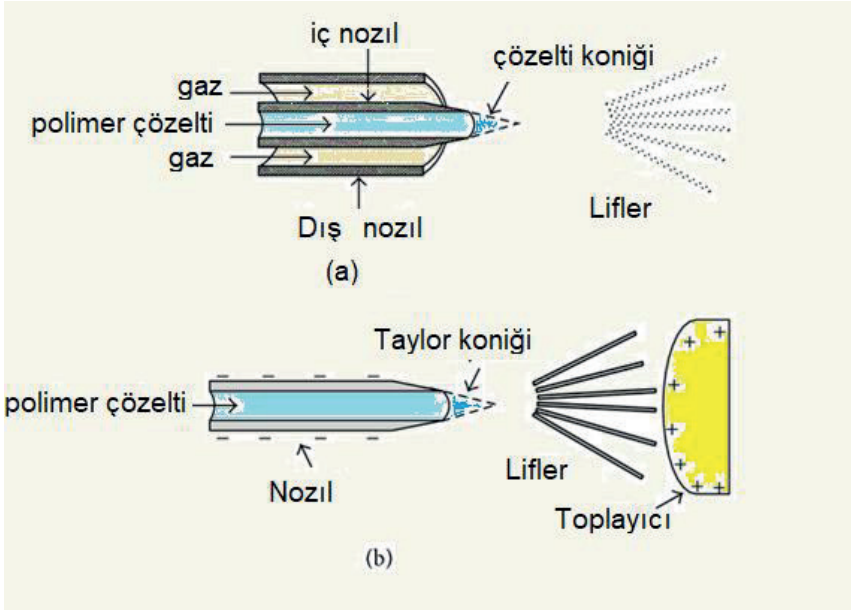


Şekil 1. Çözelti üfleme cihazı ile lif çekimi şematik çizimi (Tapanyigit, 2022).

Bu tür sistemler şematik olarak farklı görünse de prensipde aynı özelliktedir. Bu nedenle mevcut sistemler geliştirilerek farklı türde cihazlar üretilmiştir. Bu sistemler, özellikle elektrospinn cihazına kıyasla daha ekonomiktir. SBS sistemi bilim dünyasında gıda güvenliği, yara örtüsü, mat üretimi gibi uygulamalarda tercih edilmiştir. Özellikle yerinde uygulama ile anında kaplama avantajlarıyla manuel özelliğe sahiptir.



Şekil 1. Çözelti üfleli eğirme düzeneği (Medeiros vd.,2009).



Şekil 2. (a) Çözelti üfleli eğirme ve (b) elektro eğirme işlemlerinde kullanılan eşmerkezli nozıl sisteminin kesit diyagramı (Oliveira vd., 2013).

Polimer lifler, gıda ambalaj materyali olarak gıdalarda, biyomalzeme olarak doku yapı iskelelerinde, tekstil, sensör, kompozit takviye ve filtrasyon alanlarında tercih edilmektedir (Bognitzki vd.,2001). Polimer liflerin eğrilmesinde kullanılan yöntemle bağlı olarak mesafe, uygulanan teknik ve besleme hızı önemlidir.

Çözelti Üfleli Eğirme Sistemi Uygulama Örnekleri

SBS teknolojisine artan ilgi bilim dünyasında özellikle gıda muhafazasında önemli çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Farklı uygulamalarda kullanılan SBS yöntemi arıtma sistemlerinde de nanolif oluşumunda çeşitli faydalar sağlayabilir.

Yapılan çalışmalarda genelde poli (laktik asit) esaslı komplike yapılar kullanılır. Örneğin, Poli (laktik asit) ($M_n = 75.000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), Poli (ϵ -kaprolakton), ($M_n = 50.000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) ve poli(etilen oksit) ($M_n = 100.000 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), polimerler çözeltilerinin hazırlanmasında kloroform,

diklorometan ve aseton kullanılarak birkaç saat boyunca kuvvetli bir şekilde karıştırılarak çözülür. Elektro eğirme yöntemiyle hazırlanan lifler, 24 kV voltaj, 12 cm çalışma mesafesi ve $2 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ besleme hızı kullanılarak eğrilirken, çözelti üfleme eğirme yöntemiyle elde edilen liflerde 0,4 MPa hava basıncı, 12 cm çalışma mesafesi ve $120 \mu\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ besleme hızı altında üretilebilmektedir (Oliveira vd., 2013).

Çözelti üfleme eğirme yöntemiyle üretilen poli(laktik asit) ve poli(etilen oksit) çözücü polimer karışımlarının ve nanoliflerin özellikleri lif morfolojisi ve çap özellikleri incelendiğinde, çalışmada çözelti üfleme eğirme (SBS) cihazı kullanılarak çözeltilerden nano ve submikrometrik poli(D, L -laktid) lifler üretilmiştir. Lif morfolojisi ve çapı, polimer konsantrasyonu, besleme hızı ve hava basıncına bağlıdır. Polimer konsantrasyonu lif çapında ve dağılımında önemli rol oynar. Düşük polimer konsantrasyonu, boncuk-iplik yapılarının oluşumunu artırırken yüksek konsantrasyonlarda düz lifler oluşur. Lif çapı burada polimer konsantrasyonu ile artarken besleme hızı ile azalır (Oliveira vd., 2011; Oliveira vd., 2013).

Gıda maddelerinin antimikrobiyal özellikli ambalajlarla ambalajlanmasında kullanılmak üzere jelatin/zein/poliüretan kompleks nanoliflerin hızlı bir şekilde geliştirilmesinde çözelti üfleme eğirme (SBS) yöntemi kullanılabilir. Örneğin, jelatin/zein tarafının ortalama çapları 569,1 nm ile 681,7 nm arasında üretilmiştir. Nanoliflerin termal stabilitesi, natamisin ve proteinler arasında oluşan hidrojen bağları nedeniyle iyileştirilir. Su temas açısı, natamisin ilavesiyle artar ve böylece liflerin hidrofobikliği artar. Nanolifler 240 saat boyunca sürekli natamisin salınımı ile *Botrytis cinerea* ve *Alternaria alternata*'ya karşı antimikrobiyal aktivite sergiler. Ek olarak, nanofiberlerin üretimi için SBS teknolojisinin kullanılması, saatte 3 mL gibi hızlı bir besleme hızı elde edilmesini sağlamış olup, gıda ambalajlarında nanofiberlerin hızlı bir şekilde geliştirilmesinde *um promising* bir teknoloji olduğunu gösterir (Shen vd.,2021).

Çözelti üfleme eğirme (SBS), hasat sonrası işlemlerde umut vadeden bir teknolojidir. Örneğin avokadoları etkileyen başlıca mantar olan *Colletotrichum gloeosporioides*'e karşı etkili bir biyolojik kontrol ajanı

olan *Meyerozyma caribbica*'yı kapsüllere biyopolimerik nanolif oluşturulmasında Pullulan, FucoPol ve kaju sakızı polimerik çözeltileri nanolifler elde etmek için SBS ile üretilmiştir. SBS nanolif çapları 151 ila 777 nm arasında değişmektedir. Nanolifler, *M. caribbica*'nın yüksek canlılığını ve *C. gloeosporioides*'e karşı in vitro ve in vivo antifungal aktivitesini korur. *M. caribbica*'yı kapsülleyen pullulan nanolifleri, sentetik fungusit azoksistrobinden daha iyi etki göstererek mantar gelişimini önlemiştir. Sonuç olarak SBS, avokado antraknozunu kontrol etmek için *M. caribbica*'yı nanofiberler içinde başarılı bir biçimde yüklenmiştir (Vázquez-González vd., 2024).

Yine başka bir çalışmada, mor lahana veya mor tatlı patates kaynaklı antosiyanin açısından zengin gıda kalıntısı özütlerinin çeşitli konsantrasyonlarıyla (%5-15 w/w matris üzerinde) zein/jelatin nanofiber dokusuz lifleri, çözelti üfleme eğirme (SBS) tekniği ile hızlı bir şekilde üretilmiştir. Nanofiber çapları 999 nm, 882 ve 583 nm'dir. Bu şekilde nanofiberlerin mekanik, termal ve suyla ilgili özelliklerini iyileştirilmiştir ve antioksidan kapasite kazandırılmıştır. Örneğin %15 konsantrasyonlarda mor lahana ve mor tatlı patates ilave edilmiş nanofiberlerden oluşan dokusuz kumaşimsı yapılar, pastörize süt ve balık filetosunda bozulmayı önlemiştir. Burada nanoliflerin gıda uygulamalarında kullanılmak üzere ambalaj malzemeleri üretme potansiyeli yüksek olduğu görülür (Oliveira vd., 2024)

Saf PLA esaslı beş farklı karışım ile yapılan bir çalışmada, polimer konsantrasyonu yine %6 ağırlık oranına ayarlanmıştır ve çözücü kloroformdur. Burada numuneler birkaç saat boyunca iyice karıştırılır. SBS cihazı, basınç regülatörü, cam şırınga ve polimer çözeltileri şırınga pompasına yerleştirilir. Eş merkezli nozullar ve kontrol edilebilir dönüş hızına sahip bir toplayıcı içeren düzenek vardır. Basınçlı hava, 0,4 MPa'dır. İç nozul, eşmerkezli dış nozulun 2 mm ötesine uzanacak şekilde konumlandırılır ve eşmerkezli nozullar arasındaki mesafe 0,5 mm ve çalışma mesafesi 12 cm'dir ve dönen bir tambur üzerine toplanır (Oliveira vd., 2013).

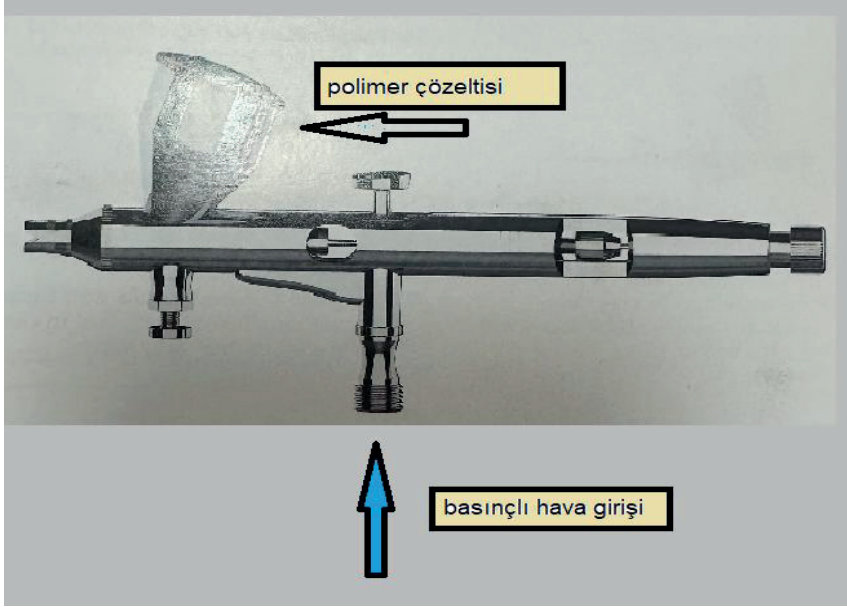
SBS yöntemi çeşitli taze ürün endüstrilerinde potansiyel uygulamalara sahip, geleneksel gıda ambalaj malzemelerine uygulanabilir, sürdürülebilir bir alternatif sunar. SBS teknolojisini kullanarak hızlı ve etkili bir yerinde paketleme sistemi geliştirmek mümkündür ve bu sistemin meyve muhafazasındaki potansiyeli çalışmada antimikrobiyal ve antioksidan maddelerle işlevselleştirilmiş nanolifler, gelişmiş mekanik özellikler, iyileştirilmiş hidrofobiklik ve güçlü biyolojik bozunabilirlik sergileyerek yerinde paketleme sistemi ile mantar enfeksiyonunu ve ağırlık kaybını azaltabilir. Ayrıca temel metabolik yolları düzenleyerek meyve olgunlaşmasını yavaşlatabilir. Gelecekteki araştırmalar, optimize edildiğinde farklı meyve türlerine de uygulanabilir ve sistem uzun vadeli çevresel etkisinin değerlendirilmesine odaklanır (Shen vd.,2022; Periyasamy, 2025)

Alternatif Endüstriyel Cihazlar ile SBS Uygulama Teknikleri

SBS ile nanolif eldesinde genelde Polilaktik asit (PLA) kullanılır, çünkü PLA biyobozunur bir makro moleküldür. Rengi şeffaf kırık beyazdır. Çözücüler oda sıcaklığında buharlaşan çözücülerdir ve o nedenle ortamdan hızlı uzaklaşır. Bu bir avantajdır. SBS yöntemi son yıllarda çeşitli cihazlarla da denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Sanayi devrimini yaşadığımız bu çağda cihaz üretimi daha kolay hale gelmiştir. Seri üretimlerle birçok hasas cihaz kolaylıkla üretilmektedir. Bunlardan biri de dövme makinesidir. Bir diğeri ise oje püskürtme cihazlarıdır. Bu cihazla hava basıncı ile çalışır ve nozıl içerir. Dövme makinaları ve püskürtmeli oje makinaları bu prensiple çalışmaktadır. Fiyat olarak uygun olan bu cihazlar her yıl yüzlerce satılmaktadır.

Alternatif bir SBS cihazı olarak düşünüldüğünde gayet kullanışlı ve ekonomik bir cihazdır. Gıda sanayinde meyve sebze gibi ürünlere yerinde uygulanabilir. Ziraat alanında toprağa veya hasarlı bölgelere yerinde uygulanabilir. Bu sistemler geliştirilerek daha faydalı cihazlara döndürülebilir. Sağlık alanında ise yine yerinde müdahale imkânı ile acil durumlarda SBS cihazıyla üretilen nanolifler yara örtüsü olarak kullanılabilir. Nanoliflere yüklenen ajanlar antimikrobiyal, antioksidan ve tedavi edici özellikler sağlar.

Güngör Ertuğral yaptığı çalışmada saf PLA ve lavanta esansiyel yağı içeren nanolif üretmek için oje püskürtme makinası kullanmış ve elektrospin yöntemi ile karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmada SBS yöntemi ile daha büyük çapta nanolifler üretilmiştir (Güngör Ertuğral, 2024). Dövme makinesi de bu alanda alternatif cihazlardan biridir ve SBS yöntemi ile nanolif üretilir. Bu amaçla kullanılan dövme makinası ve üretilen nanoliflerin fotoğrafları şekil 4,5,6'da görülmektedir.



Şekil 4. Dövme makinası aparatı fotoğrafı



Şekil 5. Dövme makinası saf PLA nanolif üretimi görseli



Şekil 6. Dövme makinesi ile plastik yüzeye püskürtülen PLA nanolif fotoğrafı

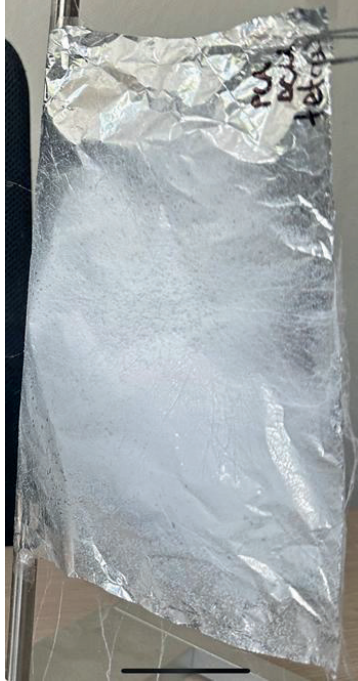
Oje püskürtme makinası ile çeşitli materyal yüzeylerine püskürtülerek saf PLA nanolif üretimine yönelik örnekler de mevcuttur. Plastik materyal (Şekil 7) ve insan eli gibi unsurlara (Şekil 8,9) uygulandığında lifli ağ görüntüsü açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Oje püskürtme makinası fotoğrafı



Şekil 8. Oje püskürtme makinası ile insan eline uygulanan saf PLA nanolif fotoğrafı



Şekil 9. Oje püskürtme makinası ile alüminyum folyo üzerine toplanmış saf PLA nanolif görüntüsü

Elektrospin yöntemine göre daha güvenli olan olan bu yöntemlerle nanolif üretmek mümkündür. Elektrospin yöntemi 24 kW gibi yüksek voltajlarda uygulanan ve iş sağlığı güvenliğini tehlikeye sokabilen cihazlardır. SBS ise pil ile çalışan bir hava pompası ile rahatlıkla nanolif üretebilmektedir.

Oje püskürtme makinası ya da dövme makinaları ise internet üzerinden sipariş edilebilen ucuz ve kolay bulunabilen cihazlardır. SBS yönteminin elektrospin yöntemine göre diğer bir avantajı ise manuel olarak istenilen yere götürebilmesi ve malzeme üzerine ya da bölgeye anında uygulanabilmesidir. Elektrospin yönteminde nanolif tek bir yerde üretilir ve elde edilen materyal yüzeyine işlem sonrası uygulanır.

Aktif gıda ambalajlarında nanoliflerin gelecekteki gelişim trendine odaklanacak olunursa bazı unsurların önemli hale gelmesi mümkündür. Bunlar maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir (Shen vd.,2024).

a. **Nanofiber hazırlama verimliliği:** Çözelti üfleme eğirme yöntemi hazırlama verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Ancak eğirme cihazlarının optimizasyonu veya yeni eğirme cihazlarının geliştirilmesi bu alandaki boşlukları dolduracaktır.

b. **Nanofiber maliyeti:** Bitkisel atık veya hayvan kıllarından, kemiklerinden veya leşlerinden protein veya polisakkaritlerin iplik malzemesi olarak elde edilmesi, kaynak kullanımını sağlamak ve nanofiber hazırlama maliyetini düşürmek için önemlidir.

c. **Nanofiberlerin çapı:** Küçük çaplı nanofiberlerde aktif madde miktarı azalabilir ve gıdanın duyu kalitesini bozabilir. Nanofiberler bu alanda genelde 100 nm'nin üzerinde çapa sahiptir ve 100 nm'den daha küçük çaplı nanofiberler üretimi meşakkatlidir.

d. **Nanofiberlerin mekanik özellikleri:** İyi mekanik özellikler, dış kuvvetlerden zararı engeller. Yüksek mekanik özelliklere sahip tabakalar iç katman olarak nanofiberlerin kullanımı mümkün olabilir.

e. **Nanofiberlerin bozunabilirliği:** Biyolojik olarak parçalanamayan petrol bazlı plastikler küresel ekolojik sorunlara yol açar. Malzemenin doğada bozunabilirliği önemlidir.

f. **Nanofiberlerin güvenliği:** Nanofiber insan vücudu üzerindeki etkileri ve gıdalar üzerindeki etkileri açısından değerlendirilir. Bazı güncel çalışmalarda malzemelerin toksisitesinin kısa vadeli olduğu görülmüştür.

g. **Nanofiberlerin çok işlevliliği:** Çok işlevli gıda ambalajları, gıdanın kalitesini sağlayan ve çevresel etkiden koruyabilen aktif ambalaj birleşimi, pazar ve tüketici açısından olumlu sonuçlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Bognitzki, M., Czado, W., Frese, T., Schaper, A., Hellwig, M., Steinhart, M., ... & Wendorff, J. H. (2001). Nanostructured fibers via electrospinning. *Advanced materials*, 13(1), 70-72.
- de Oliveira Filho, J. G., de Oliveira Silva, C., Egea, M. B., Tonon, R. V., Paschoalin, R. T., de Oliveira Rios, A., ... & Mattoso, L. H. C. (2024). Efficient and sustainable production of intelligent nonwovens as indicators of food spoilage through solution blow spinning of proteins and natural pigments from agri-food waste. *Food Control*, 166, 110707.
- Ertuğral, T. G. (2024). Influence of the preparation method on selected properties of PLA nanofibers modified with lavender oil. *Polimery*, 69(2), 112-116.
- Li, L., Li, W., Sun, W., Dong, Y., Jia, L., & Sun, W. (2024). Preparation of solution blow spinning nanofibers and its application in the food field: a review. *International Journal of Food Engineering*, 20(5), 291-302.
- Medeiros, E. S., Glenn, G. M., Klamczynski, A. P., Orts, W. J., & Mattoso, L. H. (2009). Solution blow spinning: A new method to produce micro-and nanofibers from polymer solutions. *Journal of applied polymer science*, 113(4), 2322-2330.
- Nakajima, T., Kajiwar, K., & McIntyre, J. E. (Eds.). (1994). *Advanced fiber spinning technology*. Woodhead Publishing.
- Oliveira, J. E., Mattoso, L. H., Orts, W. J., & Medeiros, E. S. (2013). Structural and morphological characterization of micro and nanofibers produced by electrospinning and solution blow spinning: a comparative study. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(1), 409572.

- Oliveira, J. E., Moraes, E. A., Costa, R. G., Afonso, A. S., Mattoso, L. H., Orts, W. J., & Medeiros, E. S. (2011). Nano and submicrometric fibers of poly (D, L-lactide) obtained by solution blow spinning: Process and solution variables. *Journal of applied polymer science*, 122(5), 3396-3405.
- Oliveira, J. E., Moraes, E. A., Marconcini, J. M., C. Mattoso, L. H., Glenn, G. M., & Medeiros, E. S. (2013). Properties of poly (lactic acid) and poly (ethylene oxide) solvent polymer mixtures and nanofibers made by solution blow spinning. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(6), 3672-3681.
- Periyasamy, T., Asrafali, S. P., & Lee, J. (2025). Recent Advances in Functional Biopolymer Films with Antimicrobial and Antioxidant Properties for Enhanced Food Packaging. *Polymers*, 17(9), 1257.
- Shen, C., Cao, Y., Rao, J., Zou, Y., Zhang, H., Wu, D., & Chen, K. (2021). Application of solution blow spinning to rapidly fabricate natamycin-loaded gelatin/zein/polyurethane antimicrobial nanofibers for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100721.
- Shen, C., Yang, Z., Rao, J., Li, J., Wu, D., He, Y., & Chen, K. (2022). Development of a thermally conductive and antimicrobial nanofibrous mat for the cold chain packaging of fruits and vegetables. *Materials & Design*, 221, 110931.
- Shen, C., Yang, Z., Wu, D., & Chen, K. (2024). The preparation, resources, applications, and future trends of nanofibers in active food packaging: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(26), 9656-9671.
- Tapanyığıt, E. B., Pektaş, K., Özdemir, M., & Balcı, O. (2022). Farklı dokusuz yüzeyler üzerinde çözelti üfleme eğirme tekniği ile Poliamid 6.6 esaslı nano lif eldesi ve araç kabin filtreleri için uygunluğunun araştırılması. *Tekstil ve Mühendis*, 29(127), 116-124.

Vázquez-González, Y., Prieto, C., Lagaron, J. M., Ragazzo-Sánchez, J. A., & Calderón-Santoyo, M. (2024). Solution Blow Spinning to Produce Antifungal Nanofibers from Pullulan, FucoPol, and Cashew Gum and Its Potential Postharvest Application on Avocado Fruit. *ACS Food Science & Technology*, 4(12), 3170-3181.



GIDALARDA RAF ÖMRÜNÜ UZATMAYA YÖNELİK ALTERNATİF KORUMA TEKNOLOJİLERİ

“ ”

Sabire YERLİKAYA¹

¹ Doç. Dr. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği
Bölümü, Karaman ORCID: 0000-0001-9842-5848

1. Giriş

Gıdalar, üretimden tüketime kadar geçen süreç boyunca bir dizi fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktöre maruz kalmaktadır. Bu etmenler; mikrobiyal gelişim, enzimatik ve oksidatif reaksiyonlar ile çevresel koşullar (sıcaklık, nem, ışık) gibi unsurları içerir ve bu unsurlar gıdanın besin değerinde, duysal özelliklerinde (renk, tat, koku, doku) bozulmalara yol açar. Özellikle bakteri, küf ve maya gibi mikroorganizmaların çoğalması hem kalite kayıplarına hem de halk sağlığı için risk oluşturan patojenlerin üründe bulunmasına zemin hazırlar (Yu ve ark., 2021).

Tarihsel olarak, tuzlama, kurutma, tütsüleme ve fermente etme gibi geleneksel koruma yöntemleri uzun yıllardır raf ömrünü uzatmak ve gıda güvenliğini sağlamak için kullanılmıştır. Ancak bu yöntemler, günümüzün artan tüketici beklentilerini ve küresel gıda ticaretinin getirdiği lojistik zorlukları karşılama konusunda yetersiz kalabilmektedir. Özellikle “temiz etiket”, katkısız veya doğal içerik talebi ve gıdada minimum işleme kabul eden tüketici davranışlarının artması, koruyucu ve işleme yöntemlerinde yenilikçi çözümlere ihtiyaç doğurmuştur (Hwang ve ark., 2023).

Günümüzde, geleneksel yöntemlere alternatif/tamamlayıcı olarak geliştirilen modern koruma teknolojileri; kimyasal, fiziksel ve biyolojik yaklaşımlar olarak üç temel başlık altında incelenmektedir. Kimyasal yöntemler, gıdada mikrobiyal gelişimi baskılayacak veya inhibe edecek ortamlar oluşturmak için organik asitler, asitli sodyum klorit, trisodyum fosfat gibi ajanları ve ozon veya CO₂ gibi gazları içerir. Organik asitlerin antimikrobiyal etkinliği; pKa değerleri, asidin moleküler yapısı ve çözeltideki iyonlaşma durumları gibi faktörlere bağlıdır (Sorathiya ve ark., 2025). Fiziksel yöntemler arasında yüksek hidrostatik basınç (HHP), vurgulu elektrik alanı, iyonize radyasyon ve UV ışını uygulamaları öne çıkar. HHP uygulamalarının özellikle ısıya duyarlı gıdalarda mikrobiyal güvenliği sağlarken besin öğelerini koruduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Barba ve ark., 2017; Hwang ve ark., 2023).

Ambalajlama teknolojilerinde de son yıllarda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Aktif paketleme sistemleri, oksijen tutucular veya antimikrobiyal ajanlar içeren materyaller sayesinde raf ömrünü uzatırken; akıllı paketleme sistemleri, pH sensörleri veya tazelik indikatörleriyle tüketiciye ürünün güvenlik durumu hakkında bilgi sunmaktadır (Mkhari ve ark., 2025).

Doğal koruyucular da son yıllarda yoğun ilgi gören alternatif yöntemler arasında yer almaktadır. Laktoferrin gibi proteinler, uçucu yağ asitleri ve bitki ekstraktları, güçlü antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri sayesinde gıda güvenliği açısından büyük potansiyele sahiptir (Nebbia ve ark., 2021). Bitkisel ekstraktlar içerdikleri polifenoller ve flavonoidler ile oksidatif reaksiyonları yavaşlatırken aynı zamanda patojen mikroorganizmaların çoğalmasını engelleyebilmektedir (Sorathiya ve ark., 2025).

Biyokoruma ise, gıdaların korunmasında mikroorganizmaların yararlı etkilerinden faydalanmayı hedefleyen bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Özellikle laktik asit bakterilerinin ürettiği organik asitler, bakteriyosinler ve diğer antimikrobiyal metabolitler, patojen mikroorganizmaların gelişimini baskılamakta ve gıdanın raf ömrünü uzatmaktadır (Trias ve ark., 2008). Laktik asit bakterilerinin aynı zamanda aroma ve tekstür gibi duyuşsal özelliklere katkı sağlaması, bu yöntemi tüketici açısından daha kabul edilebilir kılmaktadır (Castellano ve ark., 2017).

Tüm bu gelişmeler, gıda koruma teknolojilerinde tek bir yöntemin yeterli olmayacağını, aksine farklı yaklaşımların “hurdle technology” prensibiyle bir arada kullanılması gerektiğini göstermektedir. Farklı yöntemlerin kombinasyonu, tek başına kullanıldıklarında sınırlı etki gösteren teknolojilerin sinerjik şekilde daha güçlü bir koruma sağlamasına olanak tanımaktadır. Örneğin, HHP ile birlikte doğal antimikrobiyallerin uygulanması hem raf ömrünü uzatabilmekte hem de ürünün duyuşsal kalitesini koruyabilmektedir (Barba ve ark., 2017).

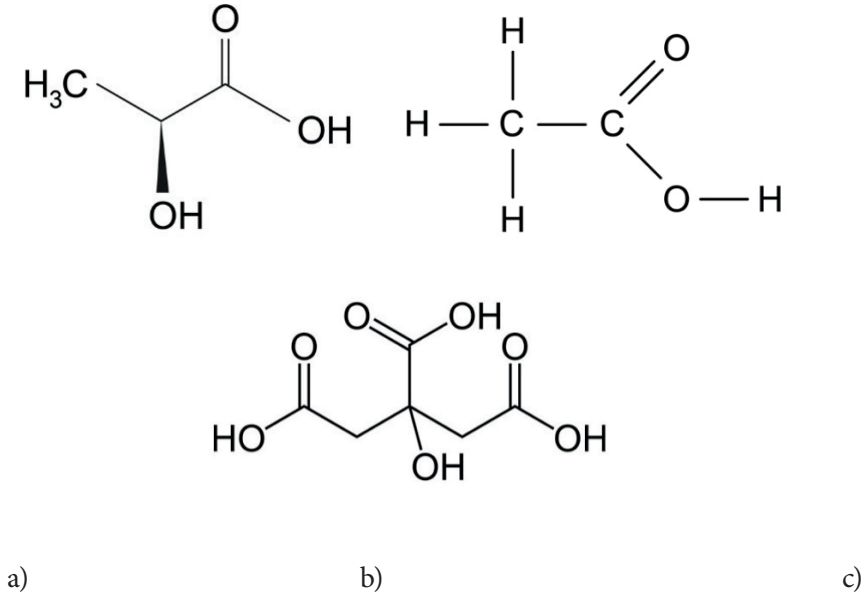
Sonuç olarak, gıda koruma yöntemlerinde yaşanan gelişmeler, endüstriye geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta ve tüketici beklentilerini karşılamaya yönelik yeni fırsatlar yaratmaktadır. Ancak her yöntemin avantajlarının yanı sıra belirli kısıtlılıkları da bulunduğundan, bu teknolojilerin seçiminde gıdanın türü, hedeflenen raf ömrü, tüketici kabulü ve maliyet unsurları dikkate alınmalıdır. Bu bölümde, gıdaların raf ömrünü uzatmaya yönelik alternatif koruma teknolojileri; kimyasal, fiziksel, ambalajlama temelli, doğal ve biyolojik yaklaşımlar başlıkları altında ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca bu yöntemlerin güncel uygulamaları, avantajları, dezavantajları ve gelecekteki potansiyelleri tartışılmıştır.

2. Kimyasal Yöntemler

Kimyasal koruma yöntemleri, gıdalarda mikrobiyal gelişimi doğrudan inhibe eden veya mikroorganizmaların yaşaması için elverişsiz bir ortam yaratan maddelerin kullanımına dayanmaktadır. Bu yöntemler, düşük maliyetli olmaları ve uygulama kolaylıkları nedeniyle uzun süredir gıda endüstrisinde yer bulmuştur. Ancak tüketici talepleri, yasal düzenlemeler ve duyuşsal kalite kaygıları nedeniyle bu yöntemlerin seçimi ve uygulama biçimi dikkatle değerlendirilmelidir (Yu ve ark., 2021).

2.1. Organik Asitler

Organik asitler, hem doğal olarak gıdalarda bulunmaları hem de antimikrobiyal etkileri nedeniyle en yaygın kullanılan kimyasal koruyucular arasındadır (Şekil 1). Laktik, asetik, sitrik, propiyonik ve sorbik asit gibi organik asitler, hücre zarının geçirgenliğini bozarak veya hücre içi pH'ı düşürerek mikrobiyal gelişimi baskılar (Sorathiya ve ark., 2025).



Şekil 1. En yaygın kullanılan organik asitlerden laktik asit (a), asetik asit (b), sitrik asit (c)

Bu asitlerin etkinliği, asidin pKa değerine, çözeltideki iyonlaşma derecesine ve gıdanın pH'ına bağlıdır. Örneğin, asetik asit düşük pH koşullarında özellikle gram negatif bakterilere karşı güçlü etki göstermektedir (Yu ve ark., 2021). Propiyonik asit, özellikle küf ve mayalara karşı etkili olup ekmek ve unlu mamullerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sorbik asit ve tuzları ise düşük konsantrasyonlarda dahi maya ve küf gelişimini inhibe edebilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, organik asitlerin bitki ekstraktları ile birlikte kullanıldığında sinerjik etki gösterebileceğini ortaya koymuştur (Sorathiya ve ark., 2025). Bu durum, daha düşük konsantrasyonlarla aynı etkiyi sağlayarak duyuşal değişimlerin önlenmesine olanak tanımaktadır.

2.2. Trisodyum Fosfat

Trisodyum fosfat (TSP), özellikle et ve kümes hayvanı ürünlerinde yüzeydeki mikrobiyal yükü azaltmada etkili bir ajandır. TSP'nin etki mekanizması, mikroorganizmaların hücre zarının bütünlüğünü bozarak hücre içeriğinin sızmasına yol açmasıdır (Fiedler ve ark., 2024). Çalışmalar, %8–12 oranında TSP çözeltilerinin özellikle *Salmonella* ve *Campylobacter* spp. gibi gıda kaynaklı patojenlerin yükünü önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir (Li ve ark., 2000).

Ancak TSP kullanımının bazı sınırlılıkları vardır. Fosfat kalıntıları duyuşal özelliklerde değışime yol açabilir ve regölasyonlar doğrutusunda kullanım seviyeleri sınırlanmıştır. Ayrıca, tüketici algısı açısından “kimyasal katkı” olarak görölmesi kabul edilebilirliği düşürebilmektedir.

2.3. Asitli Sodyum Klorit

Asitli sodyum klorit (ASC), gıdalarda güçlü bir oksidatif antimikrobiyal ajan olarak kullanılmaktadır. ASC’nin antimikrobiyal etkisi, serbest radikal-lerin ve klor dioksit benzeri aktif bileşiklerin hücre duvarını ve membran proteinlerini okside etmesinden kaynaklanır (Dhaliwal ve ark., 2025). Özellikle meyve ve sebze yüzeylerinde, et ürünlerinde ve hazır gıdalarda ASC uygulamaları patojenlerin hızlı şekilde inaktive edilmesini sağlamaktadır.

Bununla birlikte, ASC uygulamalarında duyuşal kaliteyi olumsuz etkilme riski ve kalıntı toleransları dikkatle değlendirilmelidir. Yasal düzenlemeler, ASC’nin kullanım seviyelerini belirli sınırlar içinde tutmaktadır (FDA, 2019).

2.4. Gaz Uygulamaları: Ozon ve Karbondioksit

Gaz formunda uygulanan antimikrobiyal ajanlar, yüzeyel kontaminasyonu azaltmada ve modifiye atmosfer paketleme sistemleriyle birlikte kullanıldığında raf ömrünü uzatmada etkili araçlardır.

Ozon, güçlü oksidatif özellikleri sayesinde hücre duvarı ve membranındaki lipid ve proteinleri oksitleyerek mikroorganizmaları hızla inaktive edebilir (Khadre ve ark., 2001). Ayrıca ozon, su ve hava dezenfeksiyonunda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Gıda yüzeylerinde ozon uygulamaları, özellikle taze meyve ve sebzelerde patojenlerin kontrolünde etkili bulunmuştur.

Karbondioksit (CO₂) ise modifiye atmosfer paketleme (MAP) sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. CO₂, gıdanın yüzeyinde çözünerek pH’ı düşürür ve hücre içi metabolizmayı baskılar (Farber, 1991). Özellikle et, balık ve süt ürünlerinde CO₂ oranının artırılmasıyla mikrobiyal gelişimin yavaşlatıldığı rapor edilmiştir. Ancak yüksek konsantrasyonlarda CO₂, gıdanın duyuşal özelliklerinde (örneğin doku sertliği) istenmeyen değışimlere yol açabilmektedir.

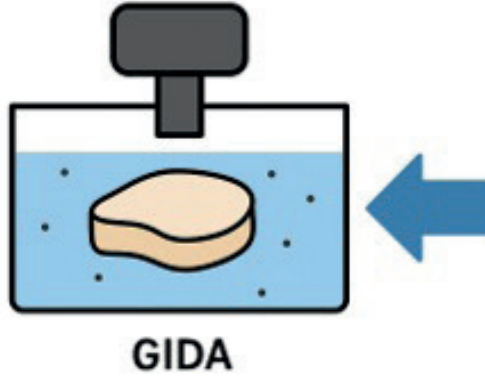
Kimyasal yöntemler, gıda güvenliği ve raf ömrü açısından uzun süredir kullanılan etkili stratejilerden biridir. Bununla birlikte tüketici algısı, yasal kısıtlamalar ve duyuşal kalite üzerindeki olası olumsuz etkiler nedeniyle tek başına yeterli görölmemektedir. Güncel eğilim, kimyasal yöntemlerin daha düşük konsantrasyonlarda kullanılarak doğal koruyucular veya fiziksel yöntemlerle kombine edilmesi yönündedir (Barba ve ark., 2017).

3. Fiziksel Yöntemler

Fiziksel yöntemler, gıdaların mikrobiyal yükünü azaltmak, raf ömrünü uzatmak ve duyuşal özellikleri korumak amacıyla uygulanan, kimyasal katkı içermeyen teknolojilerdir. Bu yöntemler, yüksek etkinlik, çevresel uyum ve tüketici taleplerine uygunluk açısından son yıllarda giderek önem kazanmaktadır. Fiziksel yöntemler arasında yüksek hidrostatik basınç, vurgulu elektrik alanı, iyonize radyasyon, ultraviyole (UV) ışınım ve aktif/akıllı paketlenme teknikleri öne çıkmaktadır.

3.1. Yüksek Hidrostatik Basınç (High Pressure Processing - HPP)

Şekil 2’de görüldüğü gibi yüksek hidrostatik basınç, gıda ürünlerine genellikle 100–600 MPa aralığında basınç uygulanarak mikroorganizmaların inaktivasyonunu sağlayan bir teknolojidir. HPP, düşük sıcaklıkta uygulanabilmesi sayesinde gıdanın besin değerini, aroma ve rengini büyük ölçüde korur (Barba ve ark., 2017).



Şekil 2. Gıdalara uygulanan yüksek hidrostatik basınç

Mekanizma olarak, basınç hücre membranlarının bütünlüğünü bozar, protein yapılarını denatüre eder ve enzim aktivitesini engeller. Özellikle sıvı gıdalar, et ürünleri ve hazır yemeklerde etkili sonuçlar vermektedir. Örneğin, HPP uygulaması ile taze meyve suları ve et ürünlerinde patojen yükünde %99’un üzerinde azalma sağlandığı rapor edilmiştir (Hwang ve ark., 2023).

HPP’nin avantajları arasında kimyasal katkı kullanımını azaltabilmesi, duyuşal özellikleri koruması ve enerji tasarrufu yer alırken, dezavantajları arasında yüksek yatırım maliyeti ve ekipman gereksinimi bulunmaktadır.

3.2. Vurgulu Elektrik Alanı (Pulsed Electric Fields - PEF)

Vurgulu elektrik alanı, kısa süreli ancak yüksek voltajlı elektrik darbele-ri kullanarak mikroorganizmaların hücre zarında geçirgenlik oluşturan bir

tekniktir (Şekil 3). Bu yöntem, özellikle sıvı gıda işleme ve dezenfeksiyonunda tercih edilmektedir (Vanga ve ark., 2021).



Şekil 3. Vurgulu elektrik alanı uygulamasının yapıldığı gıda örnekleri

PEF'nin temel avantajı, ısı işlem yapılmadan mikrobiyal yükün azaltılabilmesidir. Bu sayede vitamin, aroma ve doğal renk bileşenleri korunur. Örneğin meyve sularında PEF uygulaması ile mikrobiyal yük %90'ın üzerinde azaltılabilirken, ürünün tazeliği ve duyu kalitesi korunmaktadır (Vega-Mercado ve ark., 1996). Uygulama parametreleri (voltaj, darbe süresi, frekans) mikrobiyal inaktivasyon düzeyini doğrudan etkiler. Bu nedenle her ürün tipi için optimum parametrelerin belirlenmesi önemlidir.

3.3. İyonize ve UV Radyasyon

İyonize radyasyon (örneğin gama ışınları, elektron ışınları) ve UV ışınım, mikroorganizmaların DNA yapısını bozarak üremelerini engelleyen fiziksel yöntemlerdir. İyonize radyasyon, özellikle kurutulmuş gıdalar, baharatlar, et ürünleri ve deniz ürünlerinde mikrobiyal yükün azaltılmasında etkilidir (Singh ve Singh, 2020). Bu yöntem, ürün sıcaklığında anlamlı bir artış olmadan uygulanabildiği için termal bozulma riskini ortadan kaldırır. Ancak tüketici algısı ve regülasyonlar, radyasyon kullanımını sınırlayan faktörler arasındadır.

UV ışınım, yüzey dezenfeksiyonu için kullanılan çevre dostu ve kimyasal katkı içermeyen bir yöntemdir. UV-C ışık (200–280 nm), DNA zincirinde pyrimidine dimers oluşturarak mikrobiyal çoğalmayı engeller. Özellikle taze meyve, sebze ve su arıtma uygulamalarında etkili bulunmuştur (Gómez-López ve ark., 2021).

3.4. Aktif ve Akıllı Paketleme

Aktif paketleme, gıdanın raf ömrünü uzatmak amacıyla ambalaj içine mikrobiyal gelişimi kontrol eden veya oksidasyonu engelleyen maddelerin dahil edilmesiyle sağlanır. Akıllı paketleme ise gıdanın durumunu izleyen sensörler veya göstergeler içeren paketleme sistemleridir (Mkhari ve ark., 2025).

Aktif paketleme teknikleri arasında oksijen emici, etilen absorbe edici ve antimikrobiyal ajan içeren ambalajlar bulunmaktadır. Akıllı paketleme ise sıcaklık, pH ve mikrobiyal yük değişimlerini algılayarak tüketiciye bilgi sağlayabilir. Bu yöntemler, özellikle taze ürünlerde gıda israfını azaltmak ve tüketici güvenliğini artırmak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Fiziksel yöntemler, modern gıda koruma teknolojilerinin en umut verici alanlarından biridir. Yüksek verimlilikleri, kimyasal katkı ihtiyacını azaltmaları ve duysal kaliteyi korumaları, bu yöntemleri sürdürülebilir gıda işleme çözümleri arasında öne çıkarmaktadır. Ancak maliyet, uygulama ekipmanı gereksinimleri ve teknolojinin her gıda türüne uygun olmaması gibi sınırlılıklar, daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmasına ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Barba ve ark., 2017).

4. Ambalajlama Teknolojileri

Günümüz gıda endüstrisinde ambalajlama teknolojileri, yalnızca gıda ürününü fiziksel olarak muhafaza etmekten çok daha fazlasını ifade etmektedir. Ambalaj; ürünün mikrobiyolojik güvenliğini sağlamak, raf ömrünü uzatmak, kaliteyi korumak ve tüketiciye bilgi sunmak gibi çok yönlü işlevlere sahiptir. Bu kapsamda modern ambalajlama, inovatif materyaller ve teknolojiler ile evrilmektedir (Majid, 2016).

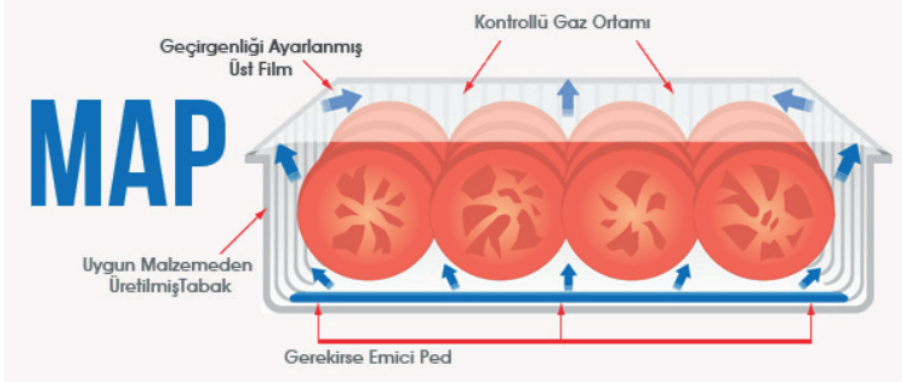
Ambalajlama teknolojilerinin gelişimi, gıda bozulma mekanizmaları ve tüketici taleplerindeki değişimlerle doğrudan bağlantılıdır. Gıdalar, oksijen, nem, ışık, mikroorganizmalar ve kimyasal reaksiyonlar gibi faktörler nedeniyle bozulur. Ambalajın bu süreçlerdeki rolü; koruma, izolasyon ve kontrol sağlamaktır. Özellikle gıdada güvenlik beklentilerinin artması, ambalaj teknolojilerinin aktif ve akıllı sistemlere doğru gelişmesine neden olmuştur (Robertson, 2016).

Ambalajlama teknolojilerini; koruyucu ambalajlama (protective packaging), aktif ambalajlama (active packaging) ve akıllı ambalajlama (intelligent packaging) olarak üç ana kategori altında incelemek mümkündür. Bu teknolojiler, mikrobiyal yükü azaltma, oksidatif bozulmayı önleme, mekanik ve kimyasal koruma sağlama gibi farklı avantajlar sunar.

4.1. Koruyucu Ambalajlama

Koruyucu ambalajlama, gıdayı fiziksel, kimyasal ve mikrobiyal etkilerden korumayı hedefler. Bu yaklaşım, ambalajın bariyer özellikleri ile sağlanır. Bariyer özellikleri, gaz, nem ve ışık geçirgenliğini kontrol ederek ürün kalitesinin korunmasına yardımcı olur (Ahvenainen, 2003).

Vakum paketlenme ve modifiye atmosfer paketlenme (MAP) (Şekil 4), koruyucu ambalajlama tekniklerinin en yaygın örnekleridir.



Şekil 4. Modifiye atmosfer paketlenme

Vakum paketlenmede paket içindeki hava tamamen uzaklaştırılırken, MAP sisteminde paket içindeki atmosfer kontrollü olarak değiştirilir. Bu yöntemler, özellikle et, balık, süt ürünleri ve taze sebzelerde mikrobiyal büyümenin yavaşlatılmasında etkili olur (Farber, 1991).

MAP'nin avantajları arasında mikrobiyal bozulmayı engellemenin yanı sıra ürün renginin, dokusunun ve besin değerinin korunması yer almaktadır. Bununla birlikte, uygulama sırasında gaz karışımının ürün tipine uygun olarak belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

4.2. Aktif Ambalajlama

Aktif ambalajlama, ambalaj malzemesinin pasif bir koruma sağlama işlevinden çıkarak, gıda kalitesini ve güvenliğini aktif olarak iyileştiren sistemleri kapsar. Bu sistemlerde ambalaj içine oksijen emiciler, etilen absorbe ediciler, antimikrobiyal ajanlar veya nem düzenleyiciler entegre edilir (Robertson, 2016). Oksijen emiciler, paket içindeki oksijen seviyesini azaltarak oksidatif bozulmayı engeller. Etilen absorbe ediciler, özellikle meyve ve sebzelerde olgunlaşma sürecini kontrol eder. Mikrobiyal kontrol sağlayan aktif ambalajlama, uçucu yağ bileşikler gibi doğal antimikrobiyal ajanların kullanılmasını da kapsar. Kekik yağı, karanfil yağı gibi bileşenler bakteriyel ve fungal hücre zarlarını bozar, böylece mikrobiyal gelişimi engeller (Appendini & Hotchkiss, 2002). Aktif ambalajlama, özellikle minimal işlenmiş gıdalarda ve yüksek raf ömrü talep edilen ürünlerde önemli avantajlar sağlar. Ancak

maliyet, ürün ile ambalajın uyumu ve tüketici kabulü gibi faktörler, uygulamanın yaygınlaşmasında kritik rol oynar.

4.3. Akıllı Ambalajlama

Akıllı ambalajlama, ambalajın gıda ürününün durumunu algılayarak tüketiciye bilgi sunmasını sağlayan yenilikçi sistemleri içerir. Bu sistemler, sıcaklık, pH, gaz bileşimi ve mikrobiyal yük gibi parametreleri izleyerek ambalaj üzerinde görsel göstergeler oluşturur (Yam ve ark., 2005). Zaman-sıcaklık göstergeleri (TTI), pH göstergeleri ve gaz sensörleri, akıllı ambalajlama teknolojilerinin temel örnekleridir. Bu göstergeler, tüketiciye ürünün tazeliği ve güvenliği hakkında doğrudan bilgi verir. Böylece gıda israfı azalırken, tüketici güvenliği artar. Akıllı ambalajlama teknolojileri, lojistik süreçlerde izlenebilirlik sağlar ve tedarik zincirinde kalite kontrolünü kolaylaştırır. Özellikle organik ve minimal işlenmiş gıdalarda, bu sistemlerin kullanımı giderek artmaktadır.

4.4. Gelecek Perspektifi

Ambalajlama teknolojilerinde sürdürülebilirlik, çevre dostu malzemeler ve biyobozunur paketleme sistemleri öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Nanoteknoloji, biyopolimerler ve sensör teknolojilerindeki gelişmeler, gelecekte ambalajlama sistemlerinin daha etkili ve çevreci olmasını sağlayacaktır (Siracusa ve ark., 2008). Bu teknolojik gelişmeler, sadece gıda güvenliğini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda çevresel etkileri azaltarak gıda endüstrisinin sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayacaktır.

5. Doğal Koruyucular ve Biyokoruma

Doğal koruyucular, modern gıda teknolojisinde kimyasal katkı maddelerine alternatif olarak giderek önem kazanmaktadır. Tüketici eğilimleri, kimyasal katkı maddelerinden uzak, “temiz etiket” gıdalara olan talebi artırmıştır (Burt, 2004). Doğal koruyucular, bitki kökenli bileşikler, laktoferrin gibi süt proteinleri, probiyotikler ve diğer biyolojik ajanlar şeklinde geniş bir yelpazeye sahiptir. Biyokoruma ise, gıda ürünlerinin mikrobiyal bozulmasını önlemek için biyolojik ve doğal koruyucu ajanların kontrollü olarak kullanılması kapsar. Bu yaklaşım, minimal işlenmiş gıdalarda güvenliği sağlarken, kimyasal katkı kullanımını azaltır (Gálvez ve ark., 2007).

5.1. Laktoferrin

Laktoferrin, süt ve süt ürünlerinde bulunan, demir bağlayıcı glikoproteinler sınıfına ait önemli bir doğal koruyucudur (Şekil 5). Antimikrobiyal etkisi, demiri bağlayarak mikroorganizmaların çoğalması için gerekli besin kaynağını sınırlaması ile gerçekleşir (Legrand ve ark., 2005).



Şekil 5. Laktoferrinin vücutta olan etkileri

Ayrıca laktoferrin, mikroorganizma hücre zarlarını doğrudan bozarak öldürücü etki gösterir. Laktoferrin, süt ürünleri, et ürünleri, bebek mamaları ve fermente gıdalarda mikrobiyal kontrol amacıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda bağışıklık sistemi üzerinde destekleyici etkileri nedeniyle fonksiyonel gıda ürünlerinde tercih edilmektedir.

5.2. Uçucu Yağ Asitleri ve Bitki Ekstraktları

Uçucu yağlar, bitkilerden elde edilen fenolik bileşikler içerir ve bu bileşikler bakteriyel hücre zarlarını bozarak mikrobiyal inaktivasyon sağlar. Kekik, karanfil, tarçın ve sarımsak yağı gibi uçucu yağların güçlü antimikrobiyal etkileri vardır (Hyldegaard ve ark., 2012).

Bitki ekstraktları, aynı zamanda antioksidan özelliklere sahiptir. Yeşil çay ekstraktı, biberiye, kekik ve nane ekstraktları gibi bitkisel kaynaklar, gıdaların oksidatif bozulmasını önleyerek raf ömrünü uzatır. Bu ekstraktlar, özellikle et, süt ürünleri ve meyve-sebze bazlı gıdalarda etkili koruma sağlar (Negi, 2012).

5.3. Biyokoruma Yaklaşımları

Biyokoruma, yalnızca doğal koruyucuların kullanımını değil, aynı zamanda bakteriyofajlar, laktik asit bakterileri ve probiyotiklerin kontrollü kullanımını kapsar. Bu yöntemler, gıdalarda patojenlerin ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların çoğalmasını engeller (Leroy & De Vuyst, 2004).

Bakteriyofajlar, belirli bakterileri hedef alan ve yok eden virüslerdir. Laktik asit bakterileri ise fermentasyon sırasında organik asitler üreterek mikrobiyal büyümeyi inhibe eder (Şekil 6). Bu yöntemler, özellikle organik ve minimal işlenmiş gıdalarda gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.



(a)



(b)

Şekil 6. Bakteriyofaj (a), laktik asit bakterisi (*Lactococcus bulgaricus*) (b) örnekleri

Doğal koruyucular ve biyokoruma teknikleri, gıda güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından büyük potansiyele sahiptir. Geliştirilen yeni biyoteknolojik yöntemler, doğal koruyucuların etkinliğini artıracak ve biyokoruma uygulamalarının daha geniş ürün yelpazesinde kullanılmasını mümkün kılacaktır (Gálvez ve ark., 2007). Bu gelişmeler, hem tüketici sağlığını destekleyecek hem de kimyasal katkı maddelerinin kullanımını azaltarak çevresel ve sağlık açısından olumlu etkiler sağlayacaktır.

6. Biyokoruma Yaklaşımları

Biyokoruma, gıdalarda mikrobiyal bozulmayı önlemek amacıyla biyolojik kaynaklı ajanların kontrollü kullanımı anlamına gelir. Bu yaklaşım, özellikle minimal işlenmiş gıdalarda, raf ömrünü uzatmak ve kimyasal katkı maddelerini azaltmak amacıyla önem kazanmıştır (Gálvez ve ark., 2007). Biyokoruma, hem gıda güvenliği hem de tüketici sağlığı açısından sürdürülebilir ve çevre dostu bir stratejidir. Biyokoruma yöntemlerini bakteriyofajlar, laktik asit bakterileri ve probiyotikler, doğal antimikrobiyal bileşikler olmak üzere üç ana grupta toplamak mümkündür.

Bakteriyofajlar, belirli bakterileri hedef alan ve yok eden virüslerdir. Doğada yaygın olarak bulunurlar ve her biri yalnızca belirli bakteri türlerine özgüdür. Bu nedenle, biyokoruma amacıyla bakteriyofaj kullanımı, hedeflenen patojenleri spesifik olarak ortadan kaldırır (O'Flaherty ve ark., 2009). Bakteriyofajların gıda korumasında avantajları vardır. Bunlar; istenmeyen bakterilere zarar verirken faydalı mikroflorayı korumaları, doğal kaynaklı olmaları ve insan sağlığı açısından düşük risk taşımaları, kimyasal katkı maddelerine alternatif sunmaları olarak sıralanabilir.

Uygulama alanları arasında et ürünleri, süt ve süt ürünleri, taze sebze ve meyveler yer alır. Örneğin, *Listeria monocytogenes* ve *Salmonella* türlerine karşı geliştirilmiş bakteriyofaj ürünleri, Avrupa ve Amerika'da gıda korumasında kullanılmaktadır (Sillankorva ve ark., 2012). Bakteriyofajların etkinliği, ortam koşulları, pH, sıcaklık ve gıda matrisi gibi faktörlerden etkilenir. Bu nedenle uygulamalarda dikkatli optimizasyon gereklidir.

Laktik asit bakterileri (LAB), fermente gıdalarda doğal olarak bulunan ve antimikrobiyal özellikler gösteren mikroorganizmalardır. Laktik asit, hidrojen peroksit, diasetil, bakteriosin gibi bileşikler üreterek patojen ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların çoğalmasını engeller (Leroy & De Vuyst, 2004).

Organik asit üretimi ile pH düşürerek patojenlerin gelişimini engellemeleri, antimikrobiyal peptitler (bakteriosinler) salgılamaları, gıda matrisinde doğal olarak bulunmaları LAB ve probiyotiklerin biyokoruma avantajlarıdır. Bu nedenle kabul edilebilirlikleri yüksektir. Probiyotiklerin biyokoruma uygulamaları, sadece mikrobiyal kontrol ile sınırlı değildir. Ayrıca, tüketici sağlığı açısından bağışıklık sistemini güçlendiren ve sindirim sistemini destekleyen fonksiyonel özellikler sunar. Fermente süt ürünleri, yoğurt, peynir ve probiyotik takviyeli gıdalar bu yaklaşımın yaygın uygulama alanlarındandır.

Bitkilerden elde edilen uçucu yağlar, fenolik bileşikler ve diğer bitki ekstraktları biyokoruma amacıyla yaygın olarak kullanılır. Bu bileşikler bakteriyel hücre zarlarını bozarak mikrobiyal çoğalmayı engeller. Kekik yağı, karanfil yağı, tarçın yağı ve sarımsak yağı gibi uçucu yağlar güçlü antimikrobiyal etkiye sahiptir (Hyldgaard ve ark., 2012). Doğal antimikrobiyal bileşikler kimyasal katkı maddelerinin kullanımını azaltır, antioksidan özellikler ile gıdanın raf ömrünü uzatır, tüketici tarafından "temiz etiket" algısı ile kabul görür. Bu bileşikler, et ürünleri, süt ürünleri, meyve-sebze bazlı gıdalar ve ambalaj sistemlerinde aktif bileşen olarak kullanılabilir. Özellikle akıllı ve aktif ambalaj sistemlerinde doğal antimikrobiyallerin kullanımı, biyokoruma uygulamalarında gelecek vaat eden bir yönelimdir.





(a)

(b)

(c)

Şekil 7. Kekik yağı (a), Karanfil yağı (b), Tarçın yağı (c) örnekleri

Biyokoruma sistemleri, geleneksel koruyucu yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunar: kimyasal katkı ihtiyacını azaltır, mikrobiyal hedeflemede yüksek özgülük sağlar, çevresel ve sağlık açısından daha sürdürülebilir çözümler sunar. Ancak bu sistemlerin uygulanmasında bazı zorluklar da vardır: etkinlik, gıda matriksine ve işleme koşullarına bağlı olarak değişir, yüksek maliyetli olabilir, regülasyon ve tüketici kabulü gereklilikleri vardır.

Biyokoruma, özellikle minimal işlenmiş gıdalar, organik ürünler ve fonksiyonel gıdalar için sürdürülebilir bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Nanoteknoloji, biyosensörler ve genetik mühendislik gibi ileri teknolojiler, biyokoruma yöntemlerinin etkinliğini artırmak ve genişletmek için kullanılmaktadır (Gálvez ve ark., 2007). Gelecekte biyokoruma yaklaşımlarının daha geniş ürün yelpazesinde uygulanması, gıda güvenliğini artırırken aynı zamanda kimyasal katkı maddelerinin kullanımını azaltarak hem tüketici sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

7. Gelecek Perspektifleri

Gıda güvenliği, raf ömrü ve sürdürülebilirlik ihtiyaçları, ambalajlama teknolojileri ve biyokoruma alanında yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Günümüzde tüketici beklentileri, kimyasal katkı maddelerinin azaltılması, çevre dostu ambalajlar ve sağlık açısından fonksiyonel gıdalar yönünde şekillenmektedir. Bu eğilimler, gelecekteki gıda koruma teknolojilerini üç ana başlık altında şekillendirmektedir: akıllı ve aktif ambalaj sistemleri, biyoteknoloji ve nanoteknoloji tabanlı yaklaşımlar ile sürdürülebilirlik ve çevre dostu çözümler.

Gelecekte ambalajlama teknolojilerinin en önemlilerinden birinin, akıllı (intelligent) ve aktif ambalaj sistemleri olacağı düşünülmektedir. Bu sistemler, yalnızca gıdayı korumakla kalmaz; aynı zamanda gıdanın durumu hakkında bilgi verir, raf ömrünü uzatır ve bozulmayı önler (Yam ve ark., 2005).

Aktif ambalajlar; antimikrobiyal ajanlar, oksijen absorbanlar veya nem düzenleyiciler gibi işlevsel maddeler içerir. Bu, gıdanın raf ömrünü uzatmak için doğrudan gıda ortamına müdahale eder. Örneğin, uçucu yağ kapsüllerinin polimer tabanlı filmler içine gömülmesi, gıda yüzeyinde mikrobiyal büyümeyi engelleyebilir (Appendini & Hotchkiss, 2002). Akıllı ambalajlar: RFID etiketler, sensörler veya renk değiştirici göstergeler ile donatılmış ambalajlardır. Bu ambalajlar, sıcaklık, pH veya gaz konsantrasyonundaki değişiklikleri algılayarak gıda kalitesi hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlar. Böylece tedarik zincirinde hem israf azalır hem de tüketici güvenliği artar. Bu teknolojilerin, özellikle taze ürünler, deniz ürünleri ve et ürünlerinde yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Önümüzdeki yıllarda maliyetlerin düşmesiyle birlikte akıllı ambalajların geniş çaplı kullanımı beklenmektedir.

Biyokoruma ve ambalaj teknolojilerinde biyoteknoloji ve nanoteknoloji uygulamalarının da önümüzdeki dönemde daha etkin kullanılacağı tahmin edilmektedir. Genetik mühendislik ile geliştirilmiş bakteriyofajlar, daha geniş bir mikrobiyal hedef yelpazesine sahip olabilir. Ayrıca, genetik olarak optimize edilmiş probiyotik suşlar, biyokoruma etkinliğini artırabilir (Gálvez ve ark., 2007). Nanomalzemeler, ambalajların mekanik dayanıklılığını artırırken gaz bariyer özelliklerini geliştirir. Ayrıca, nano-aktivatörler ve nano-kapsüller yoluyla antimikrobiyal maddelerin kontrollü salınımı sağlanabilir. Bu, hem gıda güvenliğini artırır hem de katkı maddelerinin miktarını azaltır (Siracusa ve ark., 2008). Nanoteknoloji tabanlı sensörler, gıda bozulmasını çok daha hassas ve hızlı bir şekilde tespit ederek tedarik zincirinde gerçek zamanlı kontrol imkânı sunar.

Gelecekte gıda ambalajlama ve koruma teknolojilerinin, çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler üzerine yoğunlaşacağı düşünülmektedir. Polimer bazlı biyobozunur filmlerin, çevresel atıkları azaltmada önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir.



Şekil 8. Hindistan cevizi yağından elde edilen malzemeye örnek

Özellikle bitki bazlı malzemeler ve polilaktik asit (PLA) gibi biyopolimerler ambalajlama alanında ön plana çıkmaktadır (Şekil 8) (Siracusa ve ark., 2008). Döngüsel ekonomi prensipleri çerçevesinde, ambalaj malzemelerinin yeniden kullanımının ve geri dönüşümünün daha fazla önem kazanacağı da öngörüler arasındadır. Ambalaj üretiminde enerji verimliliği, atık minimizasyonu ve karbon ayak izi azaltma stratejilerinin, sektörün öncelikli hedefleri arasında olacağı düşünülmektedir. Bu sürdürülebilirlik yaklaşımı, hem çevresel hem de ekonomik açıdan uzun vadeli fayda sağlar ve tüketici bilincinin artmasıyla birlikte zorunlu bir trend haline gelecektir.

8. Sonuç

Gıdaların raf ömrünü uzatmaya yönelik koruma teknolojileri, günümüz gıda endüstrisinin karşı karşıya olduğu güvenlik, kalite, sürdürülebilirlik ve tüketici beklentileri gibi çok yönlü gereksinimlere yanıt veren stratejik bir alan hâline gelmiştir. Bu bölümde ortaya konulduğu üzere, tek bir koruma yönteminin tüm ürün grupları için yeterli olmadığı; aksine kimyasal, fiziksel, ambalajlama temelli ve biyolojik yaklaşımların birbirini tamamlayan özellikler gösterdiği görülmektedir. Geleneksel koruyucu tekniklerin sınırlılıkları ve tüketicilerin “doğal”, “temiz etiketli” ve minimum işlenmiş gıdalara yönelik artan talepleri, alternatif ve yenilikçi koruma uygulamalarının önemini daha da artırmıştır.

Kimyasal koruyucuların etkinliklerine rağmen duyuşsal değişimler, kalıntı limitleri ve tüketici algısı gibi kısıtlayıcı unsurlar; fiziksel yöntemlerin (HPP, PEF, UV, iyonize radyasyon) ön plana çıkmasına katkı sağlamaktadır. Bu fiziksel teknikler, besin bileşenlerini korurken mikrobiyal yükün güvenli düzeylere indirilmesine olanak tanımakta ve özellikle ısıya duyarlı ürünlerde önemli avantajlar sunmaktadır. Ambalajlama alanındaki gelişmeler ise, gıdanın pasif şekilde korunmasından aktif ve akıllı sistemler aracılığıyla kalite ve güvenlik parametrelerinin izlenmesine doğru yönelmiştir. Aktif ambalajlar oksidatif ve mikrobiyal bozulmayı azaltırken, akıllı sistemler tedarik zincirinde izlenebilirliği güçlendirmekte ve tüketiciye doğrudan bilgi sağlamaktadır.

Doğal koruyucular ve biyokoruma yaklaşımları ise sürdürülebilirlik ve fonksiyonel gıda trendleri ile uyumlu bir koruma stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Laktoferrin, uçucu yağlar ve bitki ekstraktları gibi doğal bileşenlerin antimikrobiyal ve antioksidan kapasiteleri, kimyasal katkı maddelerine güçlü alternatifler sunmaktadır. Bakteriyofajlar, laktik asit bakterileri ve probiyotikler gibi biyolojik ajanların kontrollü kullanımı ise hem gıda güvenliğini artırmakta hem de ürünün doğal mikrobiyal dengesini desteklemektedir. Bununla birlikte, bu doğal ve biyolojik yöntemlerin etkinliği ürün formülasyonu, pH, sıcaklık ve gıda matriksi gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğundan, uygulama optimizasyonu kritik önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, gıdaların raf ömrünü uzatmaya yönelik modern koruma teknolojileri, çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir. Gelecekte, nanoteknoloji, biyosensörler, biyopolimer tabanlı sürdürülebilir ambalaj sistemleri ve genetik olarak iyileştirilmiş biyokoruyucuların, koruma stratejilerinin etkinliğini ve kapsamını daha da artıracığı öngörülmektedir. Bu teknolojilerin başarıyla uygulanabilmesi için gıda güvenliği standartları, tüketici kabulü, maliyet analizi ve çevresel etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Farklı koruma yöntemlerinin “hurdle teknolojisi” ilkesi doğrultusunda eşzamanlı kullanımı ise gelecekte gıda güvenliğini sağlamada en etkili ve sürdürülebilir yaklaşım olmaya devam edecektir.

Kaynaklar

- Ahvenainen, R., 2003, Novel food packaging techniques, *Trends in Food Science & Technology*, 14 (5–8), 200–210.
- Appendini, P. ve Hotchkiss, J. H., 2002, Review of antimicrobial food packaging, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3 (2), 113–126.
- Barba, F. J., Terefe, N. S., Buckow, R., Knorr, D. ve Orlén, V., 2017, New opportunities and perspectives of high pressure treatment to improve health and safety attributes of foods, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16 (5), 1062–1084.
- Burt, S., 2004, Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods, *International Journal of Food Microbiology*, 94 (3), 223–253.
- Castellano, P., Pérez Ibarreche, M., Blanco Massani, M., Fontana, C. ve Vignolo, G. M., 2017, Strategies for pathogen biocontrol using lactic acid bacteria and their metabolites: A focus on meat ecosystems and industrial environments, *Microorganisms*, 5 (3), 38.
- Dhaliwal, H. K., Sonkar, S., V. P., Puente, L. ve Roopesh, M. S., 2025, Process technologies for disinfection of food-contact surfaces in the dry food industry: A review, *Microorganisms*, 13 (3), 648.
- Farber, J. M., 1991, Microbiological aspects of modified-atmosphere packaging technology — a review, *Journal of Food Protection*, 54 (1), 58–70.
- FDA, 2019, Code of Federal Regulations Title 21, *Food and Drug Administration Publications*.
- Fiedler, G., Nöbel, S., Matzen, S., Samtlebe, M. ve Franz, C. M. A. P., 2024, Thermal inactivation of the heat-resistant pathogens *Salmonella* Senftenberg 775W and *Escherichia coli* AW1.7 in whey concentrate, *Applied Microbiology*, 4 (1), 510–519.
- Gálvez, A., López, R. L., Abriouel, H., Valdivia, E. ve Omar, N. B., 2008, Application of bacteriocins in the control of foodborne pathogenic and spoilage bacteria, *Critical Reviews in Biotechnology*, 27 (2), 125–152.
- Gómez-López, V. M., Jubinville, E., Rodríguez-López, M. I., Trudel-Ferland, M., Bouchard, S. ve Jean, J., 2021, Inactivation of foodborne viruses by UV light: A review, *Foods*, 10 (12), 3141.
- Hwang, C.-C., Chien, H.-I., Lee, Y.-C., Lin, C.-S., Hsiao, Y.-T., Kuo, C.-H., Yen, F.-L. ve Tsai, Y.-H., 2023, Effect of high-pressure processing on the qualities of carrot juice during cold storage, *Foods*, 12 (16), 3107.
- Hyldgaard, M., Mygind, T. ve Meyer, R. L., 2012, Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components, *Frontiers in Microbiology*, 3, 12.
- Khadre, M. A., Yousef, A. E. ve Kim, J. G., 2001, Microbiological aspects of ozone app-

- lications in food: A review, *Journal of Food Science*, 71 (1), 1–20.
- Legrand, D., Ellass, E., Carpentier, M. ve Mazurier, J., 2005, Lactoferrin: A modulator of immune and inflammatory responses, *Cellular and Molecular Life Sciences*, 62 (22), 2549–2559.
- Leroy, F. ve De Vuyst, L., 2004, Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry, *Trends in Food Science & Technology*, 15 (2), 67–78.
- Lin, C. H., Adams, P. J., Huang, J. F., Sun, Y. F., Lin, J. H. ve Robertson, I. D., 2021, Contamination of chicken carcasses and the abattoir environment with *Listeria monocytogenes* in Taiwan, *British Poultry Science*, 62 (5), 701–709.
- Majid, I., 2016, Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.
- Mkhari, T., Adeyemi, J. O. ve Fawole, O. A., 2025, Recent advances in the fabrication of intelligent packaging for food preservation: A review, *Processes*, 13 (2), 539.
- Nebbia, S., Lamberti, C., Lo Bianco, G., Cirrincione, S., Laroute, V., Coccagn-Bousquet, M., Cavallarin, L., Giuffrida, M. G. ve Pessione, E., 2021, Antimicrobial potential of food lactic acid bacteria: Bioactive peptide decrypting from caseins and bacteriocin production, *Microorganisms*, 9 (1), 65.
- Negi, P. S., 2012, Plant extracts for the control of bacterial growth: Efficacy, stability and safety issues for food application, *International Journal of Food Microbiology*, 156 (1), 7–17. O’Flaherty, S., Ross, R. P. ve Hill, C., 2009, Bacteriophage and their lysins for elimination of infectious bacteria, *FEMS Microbiology Reviews*, 33 (4), 801–819.
- Robertson, G. L., 2016, Food packaging: Principles and practice (3. Baskı), CRC Press.
- Sillankorva, S., Oliveira, H. ve Azeredo, J., 2012, Bacteriophages and their role in food safety, *International Journal of Microbiology*, 2012, 863945.
- Singh, R. ve Singh, A., 2020, Applications of food irradiation technology, *Life Science Journal*, 5, 54–62.
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S. ve Dalla Rosa, M., 2008, Biodegradable polymers for food packaging: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 19 (12), 634–643.
- Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C. ve Pintado, M., 2025, Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications, *Sustainability*, 17 (8), 3434.
- Trias, R., Bañeras, L., Montesinos, E. ve Badosa, E., 2008, Lactic acid bacteria from fresh fruit and vegetables as biocontrol agents, *International Microbiology*, 11 (4), 231–236.
- Vanga, S. K., Wang, J., Jayaram, S. ve Raghavan, V., 2021, Effects of pulsed electric fields and ultrasound processing on proteins and enzymes: A review, *Processes*, 9 (4), 722.
- Vega-Mercado, H., Pothakamury, U. R., Chang, F.-J., Barbosa-Cánovas, G. V. ve Swan-

- son, B. G., 1996, Inactivation of *Escherichia coli* by combining pH, ionic strength and pulsed electric field hurdles, *Food Research International*, 29, 117–121.
- Yam, K. L., Takhistov, P. T. ve Miltz, J., 2005, Intelligent packaging: Concepts and applications, *Journal of Food Science*, 70 (1), R1–R10.
- Yu, H. H., Chin, Y.-W. ve Paik, H.-D., 2021, Application of natural preservatives for meat and meat products against food-borne pathogens and spoilage bacteria: A review, *Foods*, 10 (10), 2418.



SİSTEİN: KAYNAKLARI, ENDÜSTRİDE KULLANIMI VE ÜRETİMİ

“ ”

Emine AKSAN ALDANMAZ¹

Fatma Nuray Şimşek²

1 Dr.Öğr.Üyesi Emine AKSAN ALDANMAZ, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi,
Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 31060, Hatay Türkiye eaksan@mku.
edu.tr ORCID No: 0000-0002-9261-248X

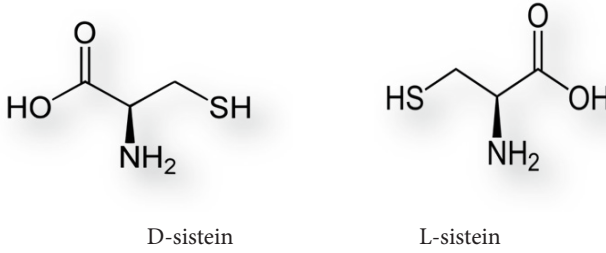
2 Dr.; Fatma Nuray ŞİMŞEK, Veterinerlik Fakültesi, 31060, Antakya-Hatay, Türkiye
fatmanuraysimsek@gmail.com ORCID No: 0000-0002-2021-3930

*Sorumlu yazar: Dr.Öğr.Üyesi Emine AKSAN ALDANMAZ

Kitap bölümü “Çeşitli Ortamlardan L-Sistein Üreten Bakterilerin İzolasyonu,
Tanimlanması Ve L-Sistein Üretim Miktarlarının Saptanması” başlıklı yüksek lisans
tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

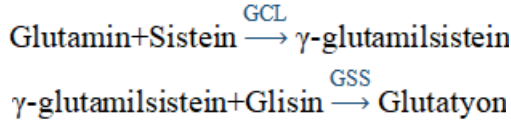
Sistein, esansiyel olmayan ve renksiz kristal yapıda bir aminoasittir. Canlı metabolizmasında önemli fonksiyonları bulunmaktadır. Hem biyolojik hem de ticari açıdan önemlidir. Molekül formülü $C_3H_7NO_2S$, molekül ağırlığı 121.16 g.mol⁻¹'dir. L ve D izomeri bulunmaktadır (Şekil 1). Doğada yaygın olarak L formundadır. Sisteinin yan zincirinde fonksiyonel bir tiol grubu yer alır ve tiol gruplarının okside olmasıyla iki sistein arasında disülfid bağları oluşmaktadır. Disülfid bağlarının oluşması, çoğu proteinin yapısının meydana gelmesinde önem taşımaktadır (Wada ve Takagi, 2006).



Şekil 2. L-Sistein dimer yapısı ve üç boyutlu yapısı

Böylece, sistein birçok proteinin üç boyutlu yapısının oluşturulmasında belirleyici rol oynamaktadır. Sistein, disülfid bağı oluşturması nedeniyle proteinlerin katlanması, birleşmesi ve stabilitesinde önem taşımakta ayrıca, indirgenen sülfürün hücreye girişini sağlayarak metionin, tiamin, biotin, koenzim A gibi temel bileşiklerin sentezinde öncü rol oynamaktadır (Guedon ve Verstraete, 2006, Renneberg ve ark., 2016).

Sistein, hücre sinyal metabolik yolunda düzenleyici göreve sahiptir (Yin ve ark., 2015). Bunların yanı sıra, antioksidanlar, vitaminler ve kofaktörler gibi temel biyomoleküllerin sentezlenmesinde yer almaktadır (Wirtz ve Droux, 2005). Sistein, yapısında bulunan serbest haldeki tiol grubu nedeniyle, glutatyon ve türevleri gibi bazı temel metabolitlerin aktif kısmını oluşturmaktadır (Dominy ve ark., 2006). Glutatyon, kuvvetli bir antioksidant olup hücrenin detoksifikasyonunu sağlamaktadır (Şekil 3)(Karabulut ve Gülay, 2016). Böylece oksidasyon kaynaklı hastalıklardan korunma ve sağlıklı bir yaşam için antioksidan savunma mekanizmasını desteklemektedirler. Son yıllarda, sisteinin antioksidan ve detoksifiye özellikleri nedeniyle sağlık, kozmetik, gıda ve yem sanayii gibi birçok alanda kullanım alanı bulunmaktadır. L-sistein'in N-asetillenmiş türevi N-asetilsistein (NAC) olarak adlandırılmaktadır ve özellikle tıbbi tedavilerde kullanılmaktadır (Atruki et al., 2007).



Şekil 3. Glutasyon sentezine sistein katılımı (Karabulut ve Gülay, 2016)

Metabolizmadaki Fonksiyonları

L-sistein, tüm organizmaların metabolizmasında önemli yeri bulunmaktadır. Vücutta, temel olarak kükürt içeren bileşiklerin (glutasyon, biotin, lipoik asit, metiyonin gibi) sentezinde kullanılmakta, protein bağlarındaki kararlılığı sağlanmakta ve metabolizmada ikincil metabolit olarak görev yapmaktadır (Wirtz and Droux, 2005).

L-sisteinin hidrosülfür grubu, aynı polipeptid zincirinde birbirinden uzakta bulunan veya iki farklı polipeptid zincirinde bulunan sisteinler ile “disülfid köprüsü” (-SS-) adı verilen kovalent bağlar yapmaktadır. Sisteinin bu özelliği, proteinlerin birincil yapısı, ikincil yapıdaki bozulmalarını ve üçüncül ve kuaterner yapıların stabilizasyonunun belirlenmesinde oldukça önemlidir. Böylece proteinlerin biyolojik aktivitelerini desteklemektedir. Proteinin yapısal motiflerinde sisteinin varlığı, enzim katalizini, transkripsiyonel düzenlemeyi ve proteinin üç boyutlu yapısının desteklenmesinde kullanılmaktadır (Plaza ve ark., 2018, Giteru et al., 2023). Sülfür köprüsü, peptid bağından daha zayıftır ancak tuz köprüsünden, hidrojen bağlarından ve hidrofobik ve Van der Waals etkileşimlerinden daha güçlüdür.

Metionin, tiamin, biotin, koenzim A, ve Fe/S (demir/kükürt) arasındaki dengenin kurulmasında vücut metabolizması için önemli yeri bulunmaktadır (Wirtz and Droux, 2005). Ayrıca, L-sistein ağır metalleri bağlayarak detoks etkisi yapmaktadır (Pavlova et al., 2023). L-sistein fonksiyonel gruplar ile, ortamın redoks potansiyeli ve pH gibi faktörlerine bağlı olarak indirgenme ve oksidasyon reaksiyonlarına girebilmektedir. Ortamdaki asidik koşullar indirgenme reaksiyonlarını, daha bazik ortam koşullarında ise oksidasyon reaksiyonlarını oluşturabilmektedir. Sülfhidril (thiol) grubu, indirgeme reaksiyonlarıyla, birçok enzim ve proteinin aktif bölgesindeki oligopeptitlerin indirgenmesinde etkilidir. Sistein ayrıca, en önemli antioksidanlar arasında olan glutasyonun hücredeki biyosentezinde ön maddedir. Glutasyonun, organizma dışından oral olarak alınması, hücre içindeki düzeyinin artırılmasında etkili olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle organizmada sistein düzeyinin düşük olması, vücudun bağışıklık sistemini bozabilmektedir. Sistein, sülfhidril (thiol) grubunun oksidasyonu ile serbest radikallerle reaksiyona girmekte veya diğer grup bileşiklerle kovalent bağlar oluşturabilmektedir (Ulricha ve Jakob, 2019).

Sisteinin Doğal Kaynakları

L-sistein, normal fizyolojik koşullar altında insan karaciğerindeki metiyoninden sentezlenebilmektedir. Bakteri veya bitkilerde ise serin, sistein sentezinde kullanılmaktadır (Plaza et al., 2018). Metabolik hastalıkları olan bireylerde, yaşlılarda ve bebeklerde, belirli koşullarda sistein yoksunluk semptomları gelişebilir. Sistein, hem gıdalar ile hem de takviye yoluyla vücuda alınabilmektedir (Mohamed et al., 2024). Önerilen günlük sistin alımı, kilogram vücut ağırlığı başına 4.1 mg'dır. 70 kg ağırlığındaki bir kişi günde 287 mg sistin tüketmelidir. (Anonim, 2020). Diyet proteinde, sistein oranı toplam amino asit miktarında en yüksek %5 düzeyindedir. Genel olarak hayvansal proteinler, bitkisel kaynaklara kıyasla daha yüksek düzeyde sistein içermektedir. Sistein tahıllarda protein içeriğinin %3-5'ini, baklagillerde proteinin de yaklaşık %2-3,5'ini oluşturmaktadır. Sistein, ayrıca çeşitli meyve ve sebzeler ve fındık ve fıstık gibi sert kabuklu yemişlerin bileşiminde doğal olarak bulunmaktadır. Sığır eti, tavuk, balık, mercimek, yulaf ezmesi, yumurta, az yağlı yoğurt, ayçekirdeği, peynir, sarımsak, soğan, keçiyoynuzu, buğday ve kırmızı biber sistein içeriği yüksek gıdalardandır (İsmail ve ark., 2014).

Tablo 1. Çeşitli gıdalarda sistein konsantrasyonları (nM/g Islak ağırlık) (Demirkol ve ark., 2004)

	Gıdalar	Sistein mg/100g)
Et	Kuzu, but ve omuz, kavrulmuş	402
	Derisiz tavuk göğsü, kavrulmuş	396
	Domuz eti, Boston bıçağı, kavrulmuş	316
	Sığır eti, aynada kızartma, kavrulmuş	370
	Somon, fırında	232
Balık	Halibut, pişmiş	243
	Ton balığı, konserve,	232
	Arpa,	219
Taneler	Pişmiş yulaf kepeği	108
	Kepekli un	381
	Kinoa	456
	Soya fasulyesi unu, yağı	757
	alınmış	47
Soya fasulyesi ürünleri	Soya sütü	268
	Soya fasulyesi (haşlanmış)	218
	Tofu, çiğ	126
	Süzme peynir, az yağlı	30
	İnek sütü	292
Mandıra	Tavuk yumurtası (Haşlanmış)	475
	Badem	127
	Bezelye (haşlanmış)	97
	Bakla, (haşlanmış)	50
	Kuru incir	17
Diğer	Avokado	

Tahılların protein içeriğinin %3-5'i, baklagil proteinin ise %2-3.5'i sistein içermektedir. Genel olarak hayvansal proteinler bitkisel kaynaklı proteinlere göre daha yüksek miktarda sistein içermektedir (İsmail ve ark., 2014). Özellikle protein içeriği yüksek gıdaların tüketilmesi sonucunda günlük alınması gerekli olan miktarda L-sistein ihtiyacı karşılanabilmektedir (Tablo 1) (Demirkol ve ark., 2004).

Demirkol, ve ark., (2004) bazı meyve ve sebzelerin l-sistein içeriklerini araştırdıkları çalışmada, sebzelerde en düşük sistein miktarı, avokado ve brokolide (4 nM/g), en yüksek sistein miktarı kırmızı biberde (349 nM/g) belirlemişlerdir. Meyvelerde ise en düşük sistein miktarı limonda (6 nM/g), en yüksek sistein miktarı çilekte (59 nM/g) saptamışlardır (Tablo 2). Meyve ve sebzelerin sistein içerikleri, yetiştirildiği bölgeye, iklim, depolama koşulları gibi etmenlere bağlı değişebileceğini açıklamışlardır. Ayrıca, çeşitli bakterilerde *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Corynebacterium glutamicum*, *Lactococcus lactis*, *Pseudomonas putida*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus sphaericus* ve *Streptomyces sp.* sistein sentezlendiği belirtilmiştir (Nazish et al., 2018, Caballero Cerbon et al., 2024).

Tablo 2. Meyvelerdeki sistein konsantrasyonları (nM/g ıslak ağırlık) (Demirkol ve ark., 2004)

Sebzeler	L-Sistein (nM/g yaş ağırlık)	Meyveler	L-Sistein (nM/g yaş ağırlık)
Kuşkonmaz	122 ± 1	Portakal	41 ± 2
Ispanak	84 ± 2	Limon	6 ± 0
Brokoli	4 ± 1	Greyfurt	15 ± 2
Karnabahar	7 ± 1	Mango	10 ± 0
Dolmalık kabak	6 ± 1	Papaya	58 ± 5
Bal kabağı	27 ± 6	Muz	7 ± 0
Salatalık	11 ± 3	Çilek	59 ± 5
Havuç	-		
Maydanoz	8 ± 1		
Domates	55 ± 3		
Kırmızı biber	349 ± 18		
Yeşil biber	9 ± 1		
Patates	-		
Avokado	4 ± 1		
Yeşil fasulye	67 ± 11		

Bitkilerde ve bakterilerde sistein sentezi üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk olarak, sülfür asimilasyonu ile inorganik sülfatın sülfite dönüşümünü sağlar. Daha sonra sisteini oluşturan karbon (C) ve nitrojen (N) sentezi gerçekleşir ve daha sonra indirgenmiş sülfür, oluşturulan omurgaya katılmaktadır (Jobe et al., 2019).

Bakterilerde, sistein, serin veya homosisteinden sentezlenebilmektedir. Enterobacteriaceae'de serinden biyosentez gerçekleştirilmektedir. sisteinin C/N omurgasının sentezi, serin asetiltransferaz tarafından katalize edilmektedir. Serin asetiltransferaz, bir asetil parçasını asetil Koenzim A'dan (asetil-CoA) serine aktararak O-asetilserin (OAS) oluşumuna yol açar. Daha sonra, serbest sülfid varlığında O-asetilserin (tiyol) liyaz, sistein sentezinden sorumludur. (Bogicevic ve ark. 2016).

Çoğu bakteride, sistein sentezinin öncüsü serindir. Örneğin, *Salmonella typhimurium* ve *E. coli* gibi enterik bakteriler serinden sistein sentezler. *Corynebacterium glutamicum*, *Brevibacterium lactofermentum* gibi korineform (glutamik asit üreten) bakteriler, metiyonin biyosentetik yollarına sahip olmalarına rağmen sisteini serinden sentezlemektedir. *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactococcus lactis* ve *Pseudomonas putida* gibi bazı mikroorganizmalarda ise metiyoninden sistein sentezlenmektedir. Bitkilerde ise, sistein sentezi, hücrelerde indirgenmiş organik kükürdün ilk formudur. Bitkilerdeki sülfür biyosentezi, doğadaki inorganik kükürtün sisteine katılması nedeniyle, en önemli biyosentetik yoldur (kükürt döngüsü). Serin asetiltransferaz ve O-asetilserin (tiol) liyaz, bitkilerde sisteinin biyosentezinde ana düzenleyici faktörlerdir. O-asetilserin, bitkilerde sistein biyosentezi için en önemli sınırlayıcı faktördür ve aynı zamanda biyosentez yolunu kontrol etmektedir (İsmael, ve ark. 2014).

Sistein, disülfid bağları oluşturarak protein stabilitesine sağladığı katkı nedeniyle, saç, yün ve tüy gibi güçlü lif tellerinin ve boynuz, toynak ve tırnak gibi güçlü yapıların oluşumunu sağlamaktadır. Bu nedenle, bu yapılarda yüksek miktarda sistein bulunmaktadır ve insan saç, ördek ve civciv tüyleri sisteinin elde edildiği kaynaklar olarak kullanılmaktadır (Krishani, ve ark. 2025).

Sisteinin Endüstride Kullanımı

Sistein metabolizmadaki birçok öneminin yanı sıra sahip olduğu özellikler nedeniyle de endüstride oldukça talep görmektedir. Ticari açıdan oldukça önemli bir aminoasittir. L-sistein, sağlık alanında (farmasötik ve tıp) tedavi amaçlı birçok ilaç ve uygulamada kullanılmaktadır, ayrıca kozmetik ve gıda endüstrisinde de farklı birçok amaçla uygulama alanı bulmaktadır. Bu endüstrilerin hepsinde uygulama bulabilen birkaç amino asitten biridir (Plaza ve ark. 2018, Caballero Cerbon, ve ark. 2024).

Farmasötik endüstride, sisteinden yaygın olarak mukolitik ajan olarak yararlanılmaktadır. Sistein ve türevi olan asetilsistein yüksek reaktif olma özelliğinden dolayı balgam söktürücü olarak öksürük ilaçlarının bileşiminde yer almaktadır. Sistein bronşlardaki mukoproteinleri kırarak mukusun sıvı hale gelmesini sağlar. Ayrıca çok farklı uygulama alanlarında da tercih edilmektedir. HIV gibi geniş çaplı enfeksiyonlar, genetik ve kronik obstrüktif

akciğer hastalığı gibi metabolik bozuklukların tedavisinde, asetominofen zehirlenmesine karşı panzehir olarak, çürük, dil ve diş eti iltihaplarının tedavisinde sistein kullanılmaktadır. L-sistein, vücutta sentezlenemediği vakalarda (premature bebeklerde ve çocuklarda) takviye olarak verilmektedir. Kanseri tedavilerinde olumlu katkısı incelenmiştir. Organ yetersizliği sonucu ortaya çıkan beyin hasarında iyileştirici etkisi belirtilmiştir (Atruki ve ark., 2007, Millea, 2009, İsmail ve ark., 2014, Qanungoa ve ark. 2015, Liu ve ark., 2017, Firdaus ve ark., 2024).

Sistein kozmetik endüstrisinde de yaygın kullanım alanına sahiptir. L-sistein saçın yapısında bulunan keratinin disülfid bağlarını kırma özelliği nedeniyle, kalıcı saç uygulamalarında ve ayrıca saç, tırnak ve cilt bakımında kullanılmaktadır. Ayrıca cilt beyazlatma ajanı olarak sisteinden yararlanılmaktadır. N-asetil sistein, yaşlanma karşıtı cilt bakım ürünlerinde etkili olarak kullanılmaktadır (Fujiwara ve ark., 2004, Piste et al. 2013, Aksoy, 2014, İsmail ve ark., 2014, Goluch-Koniuszy, 2016, Adil et al., 2018).

Gıda endüstrisinde ise yaygın olarak aroma üretiminde l-sistein kullanılmaktadır. Sistein gıdalarda E910, E920, E921 kodlarıyla yer almaktadır (Ruzanna, 2007). Sistein, özellikle fırıncılıkta ve pastacılıkta kullanılmaktadır. L-sistein, glutenle etkileşime girerek kovalent disülfid bağlarını kırarak hamurun elastikiyetini artırmakta ve böylece hamurun kabarmasını sağlayarak ekmeğin kalitesini iyileştirmektedir. Sisteinin bu etkisi nedeniyle hamurun yoğrulma zamanı kısaltmakta ve yapışması engellenmektedir. Ülkemizde sisteinin buğday unu hariç diğer unlarda, bebekler ve küçük çocuklar için üretilecek bisküvilerde kullanımı serbesttir. Gıda endüstrisinde diğer yaygın kullanımı aroma üretimidir. Vejeteryan gıdalarda et aroması sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Sistein, riboz gibi bir şekere bağlanarak ısıtma süreci boyunca ete benzer aromatik bileşikler açığa çıkarmaktadır (Majzoobi ve ark., 2011 Anonim, 2013, Tamba Berehoiu et al., 2013, Dinani et al., 2023, Shukla et al., 2025). Tüketime hazır doğranmış ve yıkanmış meyve, sebzelerin yumuşama ve kararmasını engellemek amacıyla sistein kullanılmaktadır. Enzimatik esmerleşmeyi önlemek için sisteinden faydalanılmaktadır (Özoğlu ve Bayındırlı, 2002, Vilas-Boas ve Kader, 2006, Zhang et al., 2023).

Hayvan yemlerinde, hayvanların ihtiyaç duyduğu kükürt içeren aminoasit ihtiyacını karşılamak amacıyla sistein kullanılmaktadır. Geviş getiren hayvanlarda nitrat zehirlenmesine karşı önleyici ve koruyucu etki göstermektedir. Hayvanların büyüme ve gelişim performansını olumlu yönde desteklemektedir (İsmail ve ark., 2014, Yin ve ark., 2015, Ekmay et al., 2016, Nte and Gunn, 2021).

Sisteinin Endüstriyel Üretimi

Dünya’da farmasötik, kozmetik, gıda ve yem endüstrilerinde yıllık yaklaşık 4000 ton sistein kullanılmaktadır. Yıllık %4 ile %6 oranla artan talep sebebiyle çok fazla miktarda sistein üretimine ihtiyaç duyulmaktadır (Nakamori ve ark., 1998, Caballero Cerbon et al., 2024). Sistein birçok üründe bulunmasına rağmen, endüstriyel olarak, sistein açısından zengin çeşitli dokulardan (insan saçı, yün, ördek ve civciv tüyleri gibi) ve mikroorganizmalardan üretimi yapılmaktadır. Endüstride geniş çapta üretimi hayvansal dokulardan (saç, kıllar, boynuzlar, toynaklar ve tüyler) kimyasal ekstraksiyonla elde edilmektedir. Endüstriyel olarak sistein üretiminde, bitkiler ve meyve-sebzeler kullanılmamaktadır. Ancak, bu ürünlerin sistein üretim miktarını artırmak amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, üründe besin kalitesini artırmak, bitki savunmasını artırmak amacıyla biyoaktif ve farmakolojik bileşiklerin üretimini artırmak amaçlanmaktadır (Zharif et al., 2020, Caballero Cerbon et al., 2024).

Geçmiş yıllarda sistein üretimi için ekstraksiyon yöntemi ve enzimatik yöntemlerden yararlanılmıştır. Günümüzde artan aminoasit talebini karşılayabilmek ve çevreyle uyumlu üretim gerçekleştirebilmek için yeni üretim metodları geliştirilmektedir. L-sistein üretimi keratin hidrolizi (ekstraksiyon), fermentasyon, enzimatik biyolojik dönüşüm ve biyosentez yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir (Imura et al., 2021).

Keratin hidrolizi yönteminde, keratince zengin (insan saçı, hayvan kılı, boynuz, tüy, toynak gibi) dokular kullanılmaktadır. Canlı dokularda proteinin temel yapıtaşı olan sistein, saç, tüy, yün, kıl, tırnak, boynuz gibi kuvvetli bağ yapısına sahip dokularda yüksek miktarda bulunmaktadır. Günümüzde Çin, ticari olarak bu dokulardan sistein üretimini gerçekleştirmektedir. Bu kaynakların ucuz ve kolay ulaşılabilir hammaddeler olması, ekstraksiyon yönteminin yaygın olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. 1 ton saçtan 100 kg sistein elde edilmektedir (Anonim, 2007, Renneberg ve ark., 2016). Keratin hidrolizi yönteminde aktif karbon ve konsantre hidroklorik asit kullanılmaktadır. 1 kg sistein elde etmek için 27 kg hidroklorik asit harcanmaktadır. Keratin hidrolizi yöntemi yüksek miktarda asit kullanılması atık problemi, düşük verim, kötü koku oluşumu gibi dezavantajlara sahiptir (Takagi ve Ohtsu, 2003, Haas ve ark., 2009, Fanous, 2017, Mengistu et al. 2023). Bunların yanı sıra çeşitli tüketiciler, hayvansal kaynaklardan l-sistein üretiminde, deli dana hastalığı (BSE), şiddetli akut solunum yolu sendromu (SARS) ve kuş gribi gibi virüslerden kaynaklanabilecek bulaşı olabileceği konusunda endişe belirtmektedir (Teke, 2023). Yöntemin sahip olduğu olumsuzlukların da etkisi ile günümüzde sistein üretiminde yeni yaklaşımlar izlenmektedir.

Son olarak geliştirilen yöntemlerden biri de mikrobiyal fermantasyon yöntemidir. Fermantasyon yönteminde, sistein üreten mikroorganizmalar uygun besiyeri ve koşullarda geliştirilmektedir (Leuchtenberger ve ark., 2005, Gao et al., 2026). Fermantasyonla üretimde özellikle ticari boyutta fermantasyon tankları (fermentörler) kullanılmaktadır. Fermantasyon yöntemi ile yüksek miktarda sistein üretimi yapan ülkelerden biri Japonya'dır. Fermantasyonla sistein üretiminde, *Pantoea ananatis* (genetiği değiştirilerek), *Escherichia coli* ve *Pantoea ananatis* yaygın olarak kullanılan mikroorganizmalardandır. Sisteinin fermantasyonla üretiminde önemli firmalardan biri Wacker Fine Chemicals'dır (Haas ve ark., 2009, Renneberg, 2016, Takumia, et al., 2017). Firma tarafından geliştirilen yöntem, Wacker Fine Chemicals'a Federation of German Industries tarafından 2008'de çevreye uyumlu teknoloji kategorisinde çevre ödülü kazandırmıştır. Fermantasyon ile sistein üretiminin bir çok avantajı bulunmaktadır. Keratin hidroliz yöntemi ile karşılaştırıldığında, fermantasyon çevresel sürdürülebilirlik dostu olan bir yöntemdir. Ekstraksiyon ile %60 oranında sistein elde edilirken, fermantasyon ile %90 oranında sistein elde edilmektedir. Ekstraksiyona oranla oldukça az miktarda HCl kullanılmaktadır. Ayrıca, şeker, tuz ve iz elementlerin hammadde olarak kullanılması, son ürünün patojenler ya da istenmeyen maddelerle kontaminasyonunu engelleyerek %98.5 saflıkta sistein üretimi sağlamaktadır. Fermantasyonla sistein üretiminde, *E. coli*, *Salmonella typhimurium*, *Corynebacterium glutamicum*, *Lactococcus lactis*, *Pseudomonas putida*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus sphaericus*, *Streptomyces sp.* kullanılmaktadır. Fermantasyon yöntemi ile sistein üretimi yıllık %10-12 artışla pazar payını genişletmektedir (Haas ve ark., 2009, Ismail et al., 2014, Renneberg, 2016, Caballero Cerbon et al. 2024).

Fermantasyon yöntemi ile sistein üretiminin pratik uygulaması önemli ölçüde kısıtlı kalmaktadır. Özellikle enzim katalizli teknolojilerin gelişmesi sonucu, sistein sentezinde yeni enzim katalizli yöntemlerin etkinliği araştırılmaktadır. Bu yöntemde atık miktarı ve enerji tüketimi düşüktür. Yüksek konsantrasyonlarda optik olarak saf sistein üretilabilmektedir. Ancak, sisteinin enzim aktivitesi üzerinde olumsuz etkileri bulunması ve maliyet yüksekliği yöntemin verimliliğini kısıtlamaktadır (Li et al., 2023, Sun et al., 2025). Sistein, enzimatik biyolojik dönüşüm yönteminde, *Pseudomonas thiazolinophilum* kullanılarak DL-2-amino-Δ²-thiazoline-4-carboxylic asidin (DL-ATC) asimetrik hidrolizi ile elde edilmektedir. DL-ATC bu yöntem sayesinde kimyasal olarak sentezlenip, sisteine çevrilir. Bu yöntemde ATC rasemaz, L-ATC hidrolaz ve S-karbamoil-L-sistein hidrolaz enzimleri kullanılmaktadır (Pae ve ark., 1997, Leuchtenberger ve ark., 2005, Li et al., 2023, Sun et al., 2025). Ajinomoto Co., Japonya firması, enzimatik yöntemle sistein üretimi üzerinde çalışmalar geliştirmiştir (Ivanov ve ark., 2013, Imura et al., 2021).

SONUÇ

Canlı metabolizmasında önemli fonksiyonlara sistein, global çapta farmasötik, kozmetik ve gıda endüstrilerinde kullanımı hey yıl yükselmekte ve talebi artmaktadır. Son yıllarda sisteinle ilgili araştırmalarda, en önemli antioksidan bileşik olan glutasyon ve türevlerinin aktif kısmını oluşturduğunun belirlenmesi ve böylece oksidasyon kaynaklı hastalıklardan korunmadaki önemi ortaya çıkarılmıştır. Bu nedenle sistein, oksidasyon kaynaklı hastalıklardan korunma ve sağlıklı bir yaşam için antioksidan savunma mekanizmasını desteklemektedir. Sistein, antioksidan ve detoksifiye edici özelliği sayesinde birçok hastalığın tedavisinde kullanılmaktadır.

Günümüzde endüstriyel olarak sisteinin üretimi, hayvan ve insan kaynaklı keratin açısından zengin dokulardan elde edilmektedir. Ticari olarak üretilen sisteinin %90'ı asit hidroliz yöntemiyle keratince zengin saç, tüy, kıl, tırnak, boynuz gibi hayvan veya insan kaynaklı dokulardan üretilmektedir. Ancak, insan ve hayvan kaynaklı sistein içeren ürünler, çeşitli nedenlerle bazı tüketici grupları tarafından tercih edilmemektedir. Vejeteryanlar, hayvansal kaynaklı ürünlerin kullanılmasını istememektedir. Ayrıca “koşher gıda” ve “helal gıda” da, bu ürünlerden elde edilen sisteinin kullanılmasına izin verilmemektedir. Ülkemizde insan saçının hammadde olarak kullanılamayacağı Türk gıda kodeksinde belirtilmiştir, bu nedenle de ülkemizde çeşitli üreticiler helal sertifikalı sistein kullanmaya yönelmektedir. Bunların yanı sıra çeşitli tüketiciler, hayvansal kaynaklardan l-sistein üretiminde, BSE, SARS ve kuş gribi gibi virüslerden kaynaklanabilecek bulaşının olabileceği konusunda endişe belirtmektedir.

Tüm bu nedenlerde, sisteinin günümüzde kullanılan kaynaklardaki olumsuz tepkiler nedeniyle mikrobiyal ve biyoteknolojik yöntemlerle üretim yollarına yönelmektedir. Ayrıca, sistein sentezleyen mikroorganizma türlerinin araştırılarak ticari üretimin artırılması amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adil, M. Amin, S.S., Mohtashim, M. 2018. N-acetylcysteine in dermatology. Indian J Dermatol Venereol Leprol. Volume 84, Issue 6
- Aksoy, G.G., 2014. Diffüz saç dökülmeleri; besinsel eksikler ve destekler. Türk-derm-Deri Hastalıkları ve Frengi Arşivi Dergisi, Özel Sayı (1): p.45-47.
- Anonim, 2007. <https://www.wacker.com/cms/media/en/documents /feature-pdf /Cystein.pdf>. Erişim tarihi: 20.12.2025
- Anonim, 2013. T.C. Resmi Gazete, Türk Gıda Kodeksi Gıda Katkı Maddeleri Yönetmeliği. 30.06.2013.(28693).
- Anonim, 2017. <https://www.eurpepsoc.com/cysteine-essential-inessential-amino-acid/>. Erişim tarihi: 20.12.2025
- Anonim, 2020. Cysteine and its salts: Human healthtier II assessment 29/06/2020 IMAP Group Assessment Report
- Atruki, K.R., Mantovani, J.J., Herzenberg, L.A., Herzenberg, L.A. 2007. N-Acetylcysteine-a safe antidote for cysteine/glutathione deficiency. Current Opinion in Pharmacology, 7(4), 355–359.
- Bogicevic, B., Berthoud, H., Portmann, R., Bavan, T., Meile L. and Irmeler, S. 2016. Cysteine biosynthesis in Lactobacillus casei: identification and characterization of a serine acetyltransferase, FEMS Microbiology Letters, 363, doi: 10.1093/femsle/fnw012
- Caballero Carbon, D.A.; Gebhard, L.; Dokuyucu, R.; Ertl, T.; Härtl, S.; Mazhar, A.; Weuster-Botz, D. 2024. Challenges and Advances in the Bioproduction of L-Cysteine. Molecules, 29, 486. <https://doi.org/10.3390/ molecules29020486>
- Demirkol, O., Adams, C., Ercal, N., 2004. Biologically important thiols in various vegetables and fruits. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52 (26): p.8151-8154.
- Dinani, S.T., Harst, J.P. van der, Boom, R., Goot, A.J. van der, 2023. Effect of l-cysteine and l-ascorbic acid addition on properties of meat analogues, Food Hydrocolloids, 134,
- Dominy, J., Simmons, C., Karplus, A., Gehring, A., Stipanuk, A., 2006. Identification and characterization of bacterial cysteine dioxygenases: a new route of cysteine degradation for Eubacteria. Journal of Bacteriology, 188 (15): p.5561-5569.
- Ekmay, R.D., Mei, S.J., Sakomura, N.K., Coon, C.N., 2016. The cysteine, total sulfur amino acid, tyrosine, phenylalanine+tyrosine, and non-essential amino acid maintenance requirements of broiler breeders, Poultry Science, 95, 6, 1, 1341-1347.
- Fanous, A. 2017. Cysteine Manufacturing from a Halal Perspective GIMDES 9th International Halal and Tayyib Conference , 24.11.
- Firdaus, D. A., Jihad, F.H., Mursaha, S.I.M., 2024. Sources of Cysteine-Based Pharmaceutical Drugs and Their Halal Aspects in Pharmaceutical Product Develop-

ment, Halal Studies and Society, , 1 (1) 37 - 41

Fujiwara, Y., Sahashi, Y., Aritro, M., Hasegawa, S., Akimoto, K., Ninomiya, S., Sakaguchi, Y., Seyama, Y., 2004. Effect of simultaneous administration of vitamin C, l-cysteine and vitamin E on the melanogenesis. *Biofactors*, 21 (1-4): p.415-418

Gao, H., Sun, JJ., Zhang, X., Rao, Z., Xu, M., 2026. Recent advances in microbial biosynthesis of L-cysteine and its erivative sulfur-containing antioxidants *Biotechnolgy Advances*. 86, January– February, 108744

Giteru, S.G., Ramsey, D.H., Hou, Y., Cong, L., Mohan, A., Bekhit A.El-D.A. 2023. Woolkeratin as a novel alternative protein: Acomprehensive review of extraction, purification, nutrition, safety, and food applications. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*; 22:643–687.DOI: 10.1111/1541-4337.13087

Goluch-Koniuszy Z. S., 2016. Nutrition of women with hair loss problem during the period of menopause. *Menopause Review*, 15(1): p.56-61.

Guédon, E., Verstraete, I. M., 2006. Cysteine metabolism and its regulation in bacteria. (V. F. Wendisch, Editör). In: *Aminoacid Biosynthesis-Pathways, Regulation and Metabolic Engineering*. Springer, Pub. No:5, p.195-215, ISBN:978-3-540-48595-7, Berlin.

Haas, T., Kircher, M., Köhler, T., Wich, G., Schörken, U., Hagen, R., 2009. White Biotechnology. (R. Höfer, Editör). In: *Sustainable Solutions for Modern Economies*. The Royal Society of Chemistry, No:4, p.436-479, ISBN: 978-1-84755-905-0, Cambridge.

Imura, M., Etoh, S., Iwakiri, R., Okano, K., Honda, K., 2021. Improvement of production yield of L-cysteine through in vitro metabolic pathway with thermophilic enzymes, Improvement of production yield of L-cysteine through *in vitro* metabolic pathway with thermophilic enzymes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 132, 6, 585-591.

Ivanov, K., Stoimenova, A., Obreshkova, D., Saso, L., 2013. Biotechnology in the production of pharmaceutical industry ingredients: amino acids. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 27 (2): p.3620-3626.

Ismail, N., Hashim, Y., Jamal, P., Othman, R., Salleh, H., 2014. Production of cysteine: approaches, challenges and potential solution. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 3, p.95-101.

Jobe, T.O., Zenzen, I., Karvansara, P. R. and Kopriva, S., 2019. Integration of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in transition from C3 to C4 photosynthesis, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 70, No. 16 pp. 4211–4221, doi:10.1093/jxb/erz250

Karabulut, H., Gülay, M. Ş., 2016. Antioksidanlar. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 1(1): p.65-76.

Krishani, M., Chong, J.N., Lim, W.R., Jusoh, N., Sambudi, N.S., Suhaimi, H. 2025. Synthesisand Characterization of Keratin-Based Scaffold for Potential Tissue Engineering Applications. *Fibers*, 13, 97. <https://doi.org/10.3390/ fib13070097>

- Li, W., Zhou, Z., Wan, D., 2023. Advances in the Biosynthesis of L-Cysteine Subjects: Biotechnology & Applied Microbiology Contributor: <https://encyclopedia.pub/entry/4964>,
- Leuchtenberger, W., Huthmacher, K., Drauz, K., 2005. Biotechnological production of amino acids and derivatives: current status and prospects. *Applied and Microbiological Biotechnology*, 69 (1): p.1-8.
- Liu, S., Xin, D., Wang, L., Zhang, T., Bai, X., Li, T., Xie, Y., Xue, H., Bo, S., Liu, D., Wang, Z., 2017. Therapeutic effects of l-cysteine in newborn mice subjected to hypoxiaischemia brain injury via the CBS/H₂S system: Role of oxidative stress and endoplasmic reticulum stres. *Redox Biology*, 13, p.528-540.
- Mohamed, I., El Raichani, N., Otis, A.S., Lavoie, J.C., 2024. Parenteral Cysteine Supplementation in Preterm Infants: One Size Does Not Fit All. *Biomedicines*, 12, 63. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12010063>
- Majzoobi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., Radi, M., 2011. Effects of l-cysteine on some characteristics of wheat starch. *Food Chemistry*, 124 (3): p.795-800.
- Mengistu, A., Angassa, Hindawi, I.T., 2023. Optimization of Keratin Hydrolysate Extraction from Tannery Sheep Hair. Waste. *International Journal of Chemical Engineering*. Article ID 9293505, <https://doi.org/10.1155/2023/9293505>
- Millea, P.J., 2009. N-Acetylcysteine: Multiple clinical applications. *American Family Physician*, 80 (3): p.265-69.
- Nakamori, S., Kobayashi, S.I., Kobayashi, C., Takagi, H., 1998. Overproduction of l-cysteine and l-cystine by *Escherichia coli* strains with a genetically altered serine acetyltransferase. *Applied Environmental Microbiology*, 64 (5): p.1607-1611.
- Nazish MA, Bushra M, Abdullah M. 2018. Improvement in Cysteine Production by Different Bacterial Strains. *Biomed J Sci &Tech Res* 5(1)- BJSTR. MS.ID.001130. DOI: 10.26717/ BJSTR.2018.05.001130.
- Nte, I.J. and Gunn, H.H., 2021. Cysteine in Broiler Poultry Nutrition doi: 10.5772/intechopen.97281
- Özoğlu, H., Bayındırlı, A., 2002. Inhibition of enzymatic browning in cloudy apple juice with selected antibrowning agents. *Food Control*, 13 (4): p.213-221.
- Pavlova, N.S., Pavlenko, G.I., Brichko, NA., Drozdov, D.A. and Dorozhkin, VI., 2024. The Effectiveness Of L-Cysteine in The Intoxication With The Combination Of Cadmium Andlead. *Bio Web of Conferences* 83, 02002 Stdac-2023 <https://doi.org/10.1051/Bioconf/20248302002>
- Pae, K.M., Ryo, O.H., Yoon, H.S., Schin, C.S., 1997. Kinetic properties of a l-cysteine desulphydrase-deficient mutant in the enzymatic formation of l-cysteine from DL-ATC. *Biotechnology Letters*, 14 (12): p.1143-1148.
- Piste, P. 2013. Cysteine–Master Antioxidant. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences Ijpcbs*, 3(1), 143-149.
- Plaza, N.C., García-Galbis, M.R. and Martínez-Espinosa, R.M. 2018. Review Effe-

- cts of the Usage of L-Cysteine (L-Cys) on Human Health, *Molecules*, 23, 575; doi:10.3390/molecules23030575
- Qanungoa, S., Uys, J. D., Manevich, Y., Distler, A. M., Shaner, B., Hill, E. G., Mieyal, J. J., Lemasters, J. J., Townsend, D. M., Nieminen, A. L., 2015. N-acetyl-l-cysteine sensitizes pancreatic cancers to gemcitabine by targeting the NFκB pathway. *Biomed Pharmacother*, 68 (7): p.855-864.
- Renneberg, R., Berkling, V., Loroch, V., 2016. High grade cysteine no longer has to be extraxted from hair. (A. L. Demain, Editör). In: *Biotechnology for Beginners*, Academic Press, Pub. No: 2, p.132, ISBN: 978-0-12-801224-6, Amsterdam.
- Ruzanna, M., 2007. L-cysteine Another Pandora's Box?. *The Halal Journal*, 40-43.
- Sun, Z., Yao, Z-Y., Zhang, X., Gong, J-S., Xu, G., Zhang, X., Li, H., Shi, J-S., Xu, Z-H., 2025. Synthesis of l-cysteine from glycine via a multi-enzyme cascade Molecu- lar Catalysis. 587, 115502
- Shukla, M., Gharote, A., Muchahary, S., 2025. Industrial scope of cysteine protease and its anti-gluten property: A review *Food Nutrition*, 100006, doi.org/10.1016/j. fnutr.2025.100006
- Takagi, H. Ohtsu, I., 2003. L-cytsteine metabolism and fermentation in microorga- nism. (A. Yokota, M. Ikeda, Editör). In: *Advances in biochemical engineering/ biotechnology*. Springer, No: 79, p.130-147, New York.
- Takumia, K., Ziyatdinov, M.K., Samsonov, V., Nonaka, G., 2017. Fermentative produ- ction of cysteine by *Pantoea ananatis*. *Applied and Environmental Microbio- logy*, 83(5), 2502-2516
- Tamba Berehoiu, R.M., Popa, C.N., Popescu, S., 2013. Scientific Papers Series Mana- gement, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development, 13, 1,
- Teke, A., 2023. Zoonoz Hastalıklara karşı uygulanan hijyen tedbirleri vedezenfeksiyon yöntemleri, *Akademik Et ve Süt Kurumu Dergisi*, (5), 22-30.
- Townsenda, D.M., Tewa, K.D., Tapierob, H., 2004. Sulfur containing amino acids and human disease. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 58 (1): p.47-55.
- Ulricha, K. and Jakob, U. 2019. The role of thiols in antioxidant systems *Free Radical Biology and Medicine*, 140, 20, 14-27, <https://doi.org/10.1016/j.freeradbio-med.2019.05.035>
- Vilas-Boas, E. V., Kader A. A., 2006. Effect of atmospheric modification, 1-MCP and chemicals on quality of fresh-cut banana. *Postharvest Biology and Technology*, 39 (2): p.155-162.
- Wada, M., Takagi, H., 2006. Metabolic pathways and biotechnological production of L-cysteine. *Applied Microbiology Biotechnology*, 73 (1): p.48-54.
- Wirtz, M., Droux, M., 2005. Synthesis of the sulfur amino acids: cysteine and methio- nine. *Photosynthesis Research*, 86 (3): p.345-362.
- Yin, J., Ren, W., Yang, G., Duan, J., Huang, X., Fang, R., Li, C., Li, T., Yin, Y., Hou, Y., Kim, S. W., Wu, G., 2015. L-Cysteine metabolism and its nutritional implicati-

ons.Molecular Nutrition & Food Research, 60 (1): p.134-146.

Zhang, X., Liu, J., Zhang, L.S.S., [Shi, J.](#), [Wang, Q.](#), Peng, Y., 2023. Pre-cut L-cysteine treatment inhibited the browning of fresh-cut apples regulating enzyme activities and amino acid levels [Postharvest Biology and Technology](#), 205, 112-528.

Zharif, M., Nur Azira, T., Muhamad Shirwan, A.S. and Azilawati, M.I. 2020. Recent advanced techniques in cysteine determination: a review Food Research.



ET TEKNOLOJİSİNDE MİKROENKAPSÜLASYON TEKNİKLERİ

“ ”

Nursel SÖYLEMEZ MİLLİ¹

¹ Öğr. Gör. Dr. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bilimsel Endüstriyel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi (BETUM), nurselsoylemez@ibu.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0003-3610-2706

1. Giriş

Et ve et ürünleri yüksek biyolojik değere sahip proteinler, temel amino asitler, B grubu vitaminleri ve çeşitli mineraller bakımından zengin olmaları nedeniyle beslenmede önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, bu ürünler yüksek besin içeriği ve çoğu zaman yüksek su aktivitesi gibi özellikleri nedeniyle mikrobiyal gelişim ve oksidatif reaksiyonlara elverişli bir matrise sahiptir. Bu durum, güvenlik riskleri, kalite kayıpları (renk, aroma, tekstür) ve ekonomik kayıplar üzerinden raf ömrü yönetimini et endüstrisinin temel gündemlerinden biri haline getirir (Gómez ve ark., 2018).

Son yıllarda tüketici beklentileri, güvenli ürün gerekliliğine ek olarak, daha düşük düzeyde sentetik katkı ve beslenme açısından daha dengeli ürün talepleriyle belirgin biçimde dönüşmektedir. Bu eğilim, et ürünlerinde doğal kaynaklı bileşenlerin kullanımını hızlandırmış; özellikle biyoaktif bileşikler oksidatif bozulmanın yavaşlatılması ve mikrobiyal yükün kontrolüne destek olabilecek seçenekler olarak öne çıkmıştır (Gómez ve ark., 2018; Smaoui ve ark., 2021). Benzer biçimde probiyotiklerin gıda sistemlerinde fonksiyonellik ve biyokoruma yaklaşımları açısından artan bir ilgi gördüğü bildirilmektedir (Grujović ve ark., 2025; Jan ve ark., 2025).

Bununla birlikte biyoaktif bileşiklerin ve probiyotiklerin gıdaya doğrudan ilavesi, beklenen etkinin sürdürülebilir biçimde elde edilmesini her zaman garanti etmez. Uçucu/reaktif bileşenlerin oksijen, ışık, nem ve işlem sıcaklığı gibi faktörlerle hızla kayba uğraması, probiyotiklerin ise proses ve depolama stresleri altında canlılık kaybı yaşaması yaygın sınırlılıklardır (Mehta ve ark., 2022; Jan ve ark., 2025). Ayrıca bazı doğal bileşenlerin etkin dozlarda kullanımı, ürünün duyuşal özelliklerinde istenmeyen değişimlere yol açarak tüketici kabulünü sınırlandırabilmektedir (Smaoui ve ark., 2021; Szpicer ve ark., 2025).

Bu noktada mikroenkapsülasyon, fonksiyonel bileşenlerin gıda matrisine uygulanabilirliğini artıran stratejik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Mikroenkapsülasyon, hassas bileşenleri çevresel koşullara karşı koruma, matrise geçişi kontrollü salım ile yönetme ve istenmeyen tat/aroma etkilerini azaltarak duyuşal uyumu destekleme gibi mekanizmalar üzerinden fonksiyonel sistemlerin daha stabil ve tekrarlanabilir biçimde tasarlanmasına imkân sağlar (Gómez ve ark., 2018; Mehta ve ark., 2022). Probiyotik uygulamalarında ise uygun kaplama materyalleri ve tasarımlar sayesinde canlılığın korunması ve hedeflenen etkinin desteklenmesi mümkün olabilmektedir (Chávarri ve ark., 2010; Călinoiu ve ark., 2019).

Bu bölümde, mikroenkapsülasyon teknikleriyle kaplanmış bazı biyoaktif bileşikler ve probiyotiklerin et ve et ürünlerinde bazı kalite parametrelerine etkisi incelenmiştir. Böylece bu tür yenilikçi yaklaşımların, ürünün kalitesi ve stabilitesi üzerindeki etkilerine odaklanılarak ele alınmıştır. Ayrıca mik-

roenkapsülasyon yöntemleri, yalnızca prensip düzeyinde değil, et teknolojisindeki uygulama pencereleri (formülasyona katılım, yüzey/kaplama ve aktif ambalaj) ile biyoaktif–probiyotik özelinde avantaj ve sınırlılıkları birlikte dikkate alınarak tartışılmıştır.

2. Et Teknolojisinde Mikroenkapsülasyon Teknikleri

Mikroenkapsülasyon, bir aktif bileşenin (çekirdek) uygun bir duvar/kaplama materyali ile mikrometre ölçeğinde çevrelenerek dış çevre koşullarına karşı korunması ve gıda matrisi içinde istenen işlevin daha etkin biçimde gerçekleştirilmesi esasına dayanan bir teknolojidir. Bu yaklaşım, aktif bileşenin oksijen, ışık, nem, pH değişimleri ve sıcaklık gibi etmenlere maruziyetini azaltarak stabilitesini artırmayı, aynı zamanda matrise geçişini belirli bir hızda düzenleyerek kontrollü salım sağlamayı hedefler (Mehta ve ark., 2022; Gómez ve ark., 2018). Mikroenkapsülasyon sistemleri, aktif bileşenin “kabuk içinde” yer aldığı kapsül mimarisinde ya da aktif bileşenin duvar materyali matrisi içinde dağıldığı matris tip yapılar şeklinde tasarlanabilir. Her iki durumda da temel amaç, aktif bileşenin ortamla doğrudan temasını sınırlandırmaktır (Mehta ve ark., 2022).

Et ürünleri uygulamalarında mikroenkapsülasyon, yalnızca biyoaktif bileşikler ile prebiyotik ve probiyotiklerin korunmasına yönelik bir yaklaşım değildir. Aynı zamanda bu bileşenlerin matristeki davranışını yöneterek ürün performansını iyileştiren bir fonksiyonelleştirme aracıdır. Bu kapsamda mikroenkapsülasyon; (i) aktif bileşenlerin proses ve depolama boyunca kimyasal/oksidatif bozunmasını yavaşlatma, (ii) etkinliği zamana yayarak kontrollü salım ile daha sürdürülebilir etki oluşturma, (iii) uçucu veya yoğun karakterli bileşenlerde istenmeyen tat ve aromayı maskeleyme ve (iv) bileşenlerin birbirleriyle ya da matristeki bileşenlerle doğrudan etkileşimini sınırlandırarak stabilizeyi destekleme gibi mekanizmalar üzerinden öne çıkar (Gómez ve ark., 2018; Chávarri ve ark., 2010). Bu nedenle mikroenkapsülasyon, et ve et ürünleri gibi bozulmaya duyarlı gıda sistemlerinde fonksiyonel bileşenlerin daha stabil, kontrollü ve tekrarlanabilir biçimde uygulanmasına imkân sağlayan anahtar bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir (Smaoui ve ark., 2021; Jan ve ark., 2025). Et teknolojisinde uygun yöntem seçimi, hedef bileşen ve hedef etkiye (oksidasyon/mikrobiyal kontrol/canlılık), uygulama biçimine (formülasyon–yüzey/kaplama–aktif ambalaj), proses yüküne ve duyusal kabul kriterlerine göre yapılmalıdır. Aşağıda et teknolojisinde kullanılan bazı mikroenkapsülasyon tekniklerinden bahsedilmektedir.

2.1. Emülsifikasyon

Emülsifikasyon, çekirdek fazın uygun emülgatör ve taşıyıcılarla stabilize edilerek gıda matrisi içinde kontrollü biçimde dağıtılmasına dayanır. Et teknolojisinde emülsifikasyon, özellikle emülsifiye et ürünlerinde yağ fazını protein matrisi içinde stabilize eden temel bir formülasyon yaklaşımıdır. Bu

yaklaşım lipofilik biyoaktif bileşiklerin (ör. yağda çözünen antioksidanlar/ yağ asidi bileşenleri) matrise daha homojen taşınmasına ve oksidatif bozulmanın yavaşlatılmasına hizmet eden bir taşıma ve dağıtım stratejisidir (Heck ve ark., 2021). Burger/köfte gibi ürünlerde reformülasyon ve doğal antioksidanların yağ fazı üzerinden dağıtımı için de kullanılabilir. Ancak matriksin iyonik gücü ve proses koşulları emülsiyon stabilitesini etkilediğinden sistemin optimize edilmesi gerekir (Ayuso ve ark., 2025). Probiyotikler bakımından ise emülsifikasyon, tek başına her zaman yeterli fiziksel bariyer oluşturmadığından, canlılığın korunması hedeflendiğinde sistemin duvar mimarisi/ çok katmanlı yapı veya uygun biyopolimer kombinasyonlarıyla güçlendirilmesi gerekir (Shanuke ve ark., 2025).

2.2. Püskürterek kurutma (sprey kurutma)

Sprey kurutma, akışkan bir beslemenin atomizasyonla ince damlacıklara ayrılıp kısa sürede kurutularak toz mikrokapsüllere dönüştürülmesi esasına dayanır ve gıda endüstrisinde ölçeklenebilirliği nedeniyle yaygın bir prostestir (Koç & Kaymak-Ertekin., 2010). Et teknolojisinde sprej kurutma, mikrokapsüle biyoaktiflerin veya kültürlerin toz ingredient formunda standardize edilerek sosis/burger/köfte gibi ürünlerin formülasyonuna doğrudan katılmasına olanak verir; bu yönüyle endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik açısından pratik bir platformdur. Bazı biyoaktif bileşikler açısından, uçuculuk/reaktivite kaynaklı kayıpları azaltma ve matrise daha kontrollü entegrasyon sağlama yönüyle özellikle doğal koruyucuların değerlendirilmesinde işlevsel bir seçenektir (Asres ve ark., 2025). Doğal pigmentlerin stabilitesinin iyileştirilmesi gibi renk-stabilite odaklı hedeflerde de mikrokapsülasyonun teknoloji temelli katkısı vurgulanmaktadır (Su ve ark., 2023). Probiyotikler için sprej kurutma uygulaması mümkün olmakla birlikte, kurutma stresi canlılık üzerinde belirleyici olduğundan duvar materyali ve proses koşullarının et matrisi ile birlikte optimize edilmesi gereklidir (Pérez-Chabela ve ark., 2013).

2.3. Dondurarak kurutma (liyoofilizasyon)

Liyofilizasyon, dondurma ve vakum altında süblimasyonla suyun uzaklaştırılması prensibiyle çalışır; düşük ısı yük sayesinde hassas bileşenlerin yapısal ve fonksiyonel bütünlüğünü korumaya elverişlidir (Tutun & Yurdakul, 2022). Et teknolojisinde liyofilize mikrokapsüle bileşenler genellikle toz formda fonksiyonel katkı veya starter/yardımcı kültür bileşeni olarak formülasyona eklenir, yüksek stabilite avantajına karşın maliyet ve süre nedeniyle çoğunlukla yüksek katma değerli uygulamalarda tercih edilir. Bu nedenle bazı biyoaktif bileşiklerde (ısı/oksijen duyarlılığı yüksek fraksiyonlar) depolama stabilitesinin korunması bakımından güçlü bir seçenek olarak değerlendirilir (Mehta ve ark., 2022). Probiyotikler açısından canlılığın sürdürülmesine yönelik avantajlar öne çıkar, ancak enerji maliyeti ve proses süresi,

endüstriyel uygulamada uygulanabilirliği sınırlandırabilen faktörlerdir (Jan ve ark., 2025).

2.4. Ekstrüzyon/iyonik jelasyon

Ekstrüzyon temelli kapsüllemede çekirdek bileşen bir hidrokolloid faza dağıtılır. Damlacıklar iyonik çapraz bağlanma ile jel/boncuk yapıya dönüştürülerek fiziksel bir bariyer elde edilir. Et teknolojisinde bu boncuk yapılar özellikle fermente et ürünlerinde probiyotik/starter kültürlerin tuz, pH ve oksijen gibi streslere karşı korunarak proses ve depolama boyunca daha stabil taşınması için kullanılır; ayrıca sinbiyotik tasarımlarda probiyotiklerle birlikte prebiyotiklerin aynı sistem içinde kapsüllenmesine de uygun bir platform sunar. Yöntem, görece ılımlı koşullarda çalıştığı için bazı biyoaktif bileşiklerin işlenmesi sırasında aşırı termal yüke maruz kalmadan yapıya alınmasına imkân verebilir (Soyuçok ve ark., 2019). Probiyotikler bakımından ise alginat-kitosan gibi çift katmanlı/hibrid sistemlerin, simüle gastrointestinal koşullarda canlılığı destekleyebildiği ve koruyucu bariyer etkisi oluşturabildiği gösterilmiştir (Chávarri ve ark., 2010; Călinoiu ve ark, 2019). Buna karşılık kapsül boyutu ve üretim hızı gibi parametreler, büyük ölçekli uygulamalarda proses tasarımını belirleyen kritik kısıtlardır (Encu ve ark., 2025).

2.5. Elektrostatik ekstrüzyon (titreşim/damlatma)

Elektrostatik/titreşimli damlatma, ekstrüzyon mantığını daha kontrollü damlacık oluşumuyla birleştirerek daha homojen boyut dağılımına sahip mikroboncuklar üretmeyi hedefler. Et teknolojisinde bu yöntem, fermente et ürünlerinde probiyotik/starter kültürlerin daha küçük ve tekdüze kapsüllerle matrisle homojen dağılmasını sağlayarak tane hissi riskini azaltma ve proses (tuz, pH, oksijen) stresleri altında canlılığı destekleme amacıyla öne çıkar. Bu kontrol, bazı biyoaktif bileşiklerde salım kinetiğinin daha öngörülebilir kurgulanmasına ve matriste daha düzenli dağılıma katkı sağlayabilir (Genis & Tuncer, 2019). Probiyotikler açısından yöntemin temel üstünlüğü, düşük ısı stres altında kapsülleme yapılabilmesi ve daha küçük/tekdüze kapsüllerle hem homojen dağılım hem de duyusal uyum hedeflenebilmesidir; dolayısıyla canlılık-kabul edilebilirlik dengesi için uygun bir mühendislik zemini sunar (Jan ve ark., 2025).

2.6. Koaservasyon

Koaservasyon, zıt yüklü polimerlerin belirli koşullarda faz ayrışmasıyla koaservat faz oluşturmaları ve bu fazın çekirdek çevresinde yoğunlaşarak kapsül duvarına dönüşmesi prensibine dayanır (Mehta ve ark., 2022). Et teknolojisinde özellikle oksidasyona ve ışığa duyarlı biyoaktiflerin et ürünlerine daha stabil biçimde kazandırılması ve raf ömrü yönetiminin desteklenmesi amacıyla değerlendirilebilir. Bazı biyoaktif bileşikler açısından bu yapı, oksijen/ışık gibi etkenlere karşı bariyer etkisi ve kontrollü salım sağlayabilmesi

nedeniyle raf ömrü ve stabilite hedefleriyle uyumludur (Smaoui ve ark., 2021). Bununla birlikte koaservasyon temelli kapsüller, duvar materyalinin türü ve kapsül yüklemesiyle ürünün doku/algı özelliklerini etkileyebileceğinden teknolojik kazanç-duyusal uyum dengesi mutlaka birlikte ele alınmalıdır (Calderón-Oliver ve ark., 2025). Probiyotikler bakımından koaservasyon, hücreyi çevresel streslerden kısmen izole edebilse de canlılık çıktısı duvar materyali ve proses koşullarına güçlü biçimde bağlıdır; bu nedenle uygulamalar genellikle optimizasyon gerektirir (Jan ve ark., 2025).

2.7. Elektrospraying/electrospraying

Elektrospraying/electrospraying, elektrik alan altında polimer çözelti/dağılımlarından lifsi veya partiküler taşıyıcılar üreterek yüksek yüzey alanlı ve tasarlanabilir bir kapsül mimarisi oluşturmayı amaçlar. Et teknolojisinde özellikle et yüzeyine uygulanabilen aktif kaplama/film sistemleri veya aktif ambalaj bileşenleri geliştirmede biyoaktiflerin yüzeyde kontrollü salımıyla oksidasyonun yavaşlatılması ve yüzey kaynaklı mikrobiyal yükün baskılanması hedefleri için değerlendirilebilir. Bazı biyoaktif bileşikler açısından bu mimari, salımın malzeme tasarımı üzerinden kurgulanmasına ve hassas bileşenlerin daha düşük termal yüküyle yapılandırılmasına olanak tanıyabilir (Szipicer ve ark., 2025). Ancak endüstriyel ölçeklenebilirlik, proses standardizasyonu ve maliyet gibi başlıklar, yöntemin gıda uygulamalarında rutinleşmesini sınırlandıran temel noktalar arasında yer alır (Mehta ve ark., 2022). Probiyotikler için potansiyel bulunsu da, depolama stabilitesi ve üretim hattına entegrasyonun güvenceye alınması açısından kapsamlı doğrulama gerektirir (Mehta ve ark., 2022; Szipicer ve ark., 2025).

3. Bazı Mikroenkapsüle Biyoaktif Bileşiklerin Et Ürünlerinde Uygulanması

Biyoaktif bileşikler fenolikler, bitkisel ekstraktlar, uçucu yağlar, doğal pigmentler, omega 3 yağlar ve doğal antimikrobiyaller gibi çok geniş bir gruba kapsar ve et ürünleri kullanımda temel amaç oksidasyonu yavaşlatmak, mikrobiyal gelişimi baskılamak, renk ve koku kaybını sınırlamak ve raf ömrünü uzatmaktır. Mikroenkapsülasyon yaklaşımı biyoaktiflerin işleme ve depolama sırasında hızlı kaybını azaltır, hedeflenen salınımı daha kontrollü hâle getirir ve özellikle yoğun aromalı uçucu yağlarda duyusal baskıyı yönetilebilir seviyeye çekebilir (Smaoui ve ark., 2021; Calderón-Oliver ve ark., 2025). Ayrıca bazı sistemlerde kapsül varlığı tekstür ve görünüm gibi kalite parametrelerini de etkileyebileceği için taşıyıcı tasarımının yalnız etkinlik değil ürün kalitesi odağında da değerlendirilmesi gerekir (Calderón-Oliver ve ark., 2025).

Kaplama materyali seçimi et matriksinde özel bir anlam taşır çünkü et, yüksek protein içeriği, lipid fazının varlığı, tuz ve iyonik güç, pH ve su aktivitesi gibi değişkenler nedeniyle biyoaktiflerle hızla etkileşime girebilen,

oksidatif süreçleri tetikleyebilen ve salınım kinetiğini değiştirebilen bir sistemdir. Bu yüzden biyoaktif formun serbest hâli bazen hızlı inaktivasyona, hızlı uçuculuğa veya istenmeyen duyuşsal etkilere yol açarken, uygun duvar materyali ve uygun kapsül mimarisi hem stabiliteyi hem de fonksiyonelliği birlikte optimize edebilir. Et ürünlerinde bu optimizasyonun pratikte nasıl karşılık bulunduğunu gösteren güçlü örnekler nanotaşıyıcılar, sprey kurutma mikrokapsülasyonları ve aktif kaplama veya ambalaj tabanlı sistemler üzerinden izlenebilmektedir (Gomez-Estaca ve ark., 2018; Smaoui ve ark., 2021).

Uçucu yağların nanotaşıyıcılarla et ürünlerine aktarılması, yüksek biyoaktiviteye rağmen serbest formdaki uçuculuk ve duyuşsal baskı problemini dengelemek için öne çıkan bir yaklaşımdır. Sığır burgerde *Zataria multiflora* uçucu yağının nanokapsüllenmiş formu kullanıldığında mikrobiyal ve kimyasal kalite göstergelerinde serbest forma kıyasla daha avantajlı bir performans raporlanmıştır (Torab ve ark., 2017). Benzer şekilde sığır ürünlerinde yüzey temelli korumada, biberiye uçucu yağının kitozan ve benzoik asit temelli bir nanogel yapısına alınmasıyla *Salmonella* kontrolü ve soğuk depolamada koruyucu etkinliğin güçlendirildiği bildirilmiştir (Hadian ve ark., 2017). Aynı mantıkla karanfil uçucu yağının kitozan ve miristik asit nanogel içinde kapsüllenmesi, soğuk depolanan sığır ürünlerinde *Salmonella* yükünü azaltma potansiyeli ile ilişkilendirilmiş ve uygun dozda renk üzerinde minimum olumsuz etkiyle raf ömrünü destekleyen bir seçenek olarak sunulmuştur (Rajaei ve ark., 2017; Smaoui ve ark., 2021). Uçucu yağların nanoformülasyonunda bir diğer örnek olarak tarçın uçucu yağının kitozan nanoparçacıklarında hazırlanması, güçlü aromaya bağlı olumsuz duyuşsal etkileri azaltma ve renk stabilitesini daha yönetilebilir hâle getirme amacıyla değerlendirilmiş ve enkapsülasyonun serbest forma göre daha uygulanabilir bir strateji olabileceği vurgulanmıştır (Gomez-Estaca ve ark., 2018). Ayrıca uçucu yağların ambalaj bileşenine taşınması da düşük koku baskısı ile oksidasyonu geciktirme açısından dikkat çekmektedir çünkü LDPE film içine enkapsüle edilen tarçın uçucu yağıyla peroksit ve TBARS değerlerinin daha düşük seyrettiği ve tüketici açısından tolere edilebilir bir koku profiline ulaşıldığı rapor edilmiştir (Smaoui ve ark., 2021).

Fenolikçe zengin ekstraktların endüstriyel ölçekte uygulanabilir tekniklerle mikrokapsüle edilmesi, et ürünlerinde oksidatif stabiliteyi artıran fakat formülasyon ve duyuşsal denge gerektiren bir başka damardır. Taze domuz sosisinde jabuticaba kabuğu ekstraktının maltodekstrinle sprey kurutma yoluyla mikrokapsüle edilip ürüne katılması, 15 günlük depolamada lipid oksidasyonunu anlamlı biçimde düşürmüştür; ancak daha yüksek ilave düzeyinde renk, tekstür ve genel kabul edilebilirlikte olumsuzluk gözlenirken daha düşük ilave düzeyinde bu olumsuzlukların sınırlı kaldığı bildirilmiştir (Baldin ve ark., 2016; Gomez-Estaca ve ark., 2018; Smaoui ve ark., 2021). Mortadella tipi üründe jabuticaba meyvesi ekstraktı (maltodekstrin) içeren sprey

kurutma mikrokapsüllerinin kullanımı ise duyuşal kabul edilebilirliğı korurken ürün kalitesine katkı sağılayan bir uygulama örneğı olarak literatürde yer almaktadır (Baldin ve ark., 2018). Benzer bir ölçeklenebilir yaklaşım olarak kıymada nişin ve avakado ekstresinin kolajen ve pektinle mikrokapsüle edilmesi, depolama stabilitesi açısından oksidasyonu baskılayan bir etkiyle ilişkilendirilmiş, bununla birlikte aroma ve lezzet boyutunda duyuşal hassasiyet gerektirebileceğı de tüketici değerlendirmeleri üzerinden tartışılmıştır (Calderón-Oliver ve ark., 2025). Burger etinde propolis yan ürünleri modifiye nişasta ile sprey kurutma tekniğıyle kapsüllenmiş ve ürünün düşük sıcaklıklarda depolanması sırasında raf ömrünün arttığı ifade edilmiştir (dos Reis ve ark., 2017).

Aktif kaplama ve aktif taşıyıcı yüzey yapıları, biyoaktiflerin doğrudan et yüzeyiyle kontrollü etkileşimini sağılayarak antimikrobiyal korumayı güçlendiren bir platform sunar. Tavuk etinde sodyum aljinat ve PEO karışımı nanolifler içinde phlorotannin kapsüllenmesi elektrospinning temelli bir üretimle gerçekleştirilmiş, *Salmonella enteritidis*'e karşı koruma ve raf ömrü uzatma hedefiyle değerlendirilmiş ve duyuşal bozulma oluşturmada raf ömrünü uzatabildiğı bildirilmiştir (Surendhiran ve ark., 2019; Smaoui ve ark., 2021). Benzer şekilde nar kabuğı ekstraktının kitozan ve PEO temelli nanoliflere alınmasıyla *E. coli* O157:H7 üzerine inhibisyon, raf ömründe uzama ve duyuşal kalitenin korunması aynı sistematik içinde raporlanmıştır (Surendhiran ve ark., 2020; Smaoui ve ark., 2021). Partikül temelli bir başka örnekte liyofilize nar kabuğundan elde edilen nanoparçacıkların sığır köfte sistemlerinde lipid oksidasyonunu yavaşlattığı, mikrobiyal kaliteyi ve pişirme karakteristiklerini iyileştirdiğı ve 15 güne kadar uzayan raf ömründe duyuşal açıdan olumsuz etki göstermediğı belirtilmiştir (Morsy ve ark., 2018).

Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, biyoaktif bileşiklerin mikrokapsülasyonu et ürünlerinde iki temel kazanç üretir: birincisi biyoaktiflerin oksidasyon, uçuculuk ve matriksle hızlı bağlanma gibi kayıp mekanizmalarına karşı korunması; ikincisi ise antimikrobiyal ve antioksidan etkinliğin daha düşük dozlarda ve daha uzun süre sürdürülebilir hâle gelmesidir. Buna karşılık kapsül boyutu, duvar materyalinin iyonik koşullara duyarlılığı ve ürün formülasyonundaki protein ve lipid fazıyla etkileşim, tekstür ve renk gibi kalite parametrelerinde istenmeyen sonuçlar doğurabileceğinden, et matriksi odaklı tasarım yaklaşımı zorunludur (Gomez-Estaca ve ark., 2018; Calderón-Oliver ve ark., 2025).

4. Bazı Mikrokapsüle Probiyotiklerin Et Ürünlerinde Uygulaması

Fermente et ürünlerinde probiyotik/prebiyotik/postbiyotik uygulamalarının temel hedefi, ürünün olgunlaşma ve depolama boyunca mikrobiyal ekoloji içinde işlevini sürdürebilen canlı hücreleri tüketiciye ulaştırmak, aynı zamanda kaliteyi ve güvenliğı desteklemektir. Et matriksi yüksek protein ve

yağ içeriği, tuz ve kür bileşenleri, oksijen difüzyonu, fermentasyonla hızla değişen pH değeri ve rekabetçi doğal mikrobiyota gibi faktörler nedeniyle probiyotiklerin canlılığını ve metabolik aktivitesini baskılayabilir. Bu nedenle probiyotiklerin serbest hücre olarak doğrudan eklenmesi her zaman yeterli stabiliteyi garanti etmez ve canlılığın korunması için mikroenkapsülasyon gibi teslim stratejileri gündeme gelir (Awad ve ark., 2025; Cook ve ark., 2012).

Probiyotiklerin et ürünlerinde serbest veya starter kültür olarak kullanılabildiğini gösteren endüstriyel odaklı çalışmalar, mikroenkapsülasyonun neden ihtiyaç haline gelebildiğini anlamak için önemli bir zemin sağlar. Endüstriyel koşullarda üretilen kuru fermente domuz but ve sosislerde aljinat ve kitosanla ekstrüzyon yöntemine göre kapsüle edilen probiyotik starter kültür *Lactocaseibacillus rhamnosus* LOCK900 kullanımı, probiyotik yaklaşımın üretim ölçeğinde uygulanabilirliğini ve ürün nitelikleriyle birlikte yönetilmesi gerektiğini ortaya koyar (Neffe-Skocińska ve ark., 2020). Benzer biçimde, sığır salamında *Lactiplantibacillus plantarum* 299v'nin yardımcı kültür olarak kullanımı, fermente et ürünlerinde probiyotik adaylarının teknolojik performans ve ürün karakteriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini gösteren bir örnektir (Blaiotta ve ark., 2018). Kuru fermente sosislerde probiyotik potansiyelli *Lactiplantibacillus plantarum* L125 suşunun fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve duyuşal özellikler üzerine etkilerini ele alan çalışma da probiyotik uygulamalarının yalnız canlılık düzeyiyle sınırlı kalmayıp ürün kalitesinin çok boyutlu bir çıktısı olduğunu destekler (Pavli ve ark., 2020). Bu üç çalışma, probiyotiklerin et ürünlerine entegrasyonunun mümkün olduğunu gösterirken, aynı zamanda üretim ve depolama stresleri altında canlılık ve kalite dengesinin hassas olduğunu, dolayısıyla koruyucu taşıyıcı sistem yaklaşımının rasyonel bir gerekçeyle dayandığını ortaya koyar.

Et ürünlerinde probiyotik mikroenkapsülasyonun en pratik ve yaygın platformlarından biri, iyonik jelleşmeye dayanan aljinat temelli ekstrüzyondur. Bu yaklaşımda probiyotik hücreler aljinat çözeltisi içinde boncuk formuna getirilir ve gerekirse ikinci bir polimer tabakasıyla bariyer etkisi güçlendirilir. Kuru fermente sosislerde *Enterococcus faecium* CECT 410'un serbest hücreye karşı aljinat boncuk formunda uygulanması, probiyotiklerin et matrisinde daha stabil taşınmasına ve proses boyunca fonksiyonel yükün korunmasına yönelik güçlü bir örnek sunar (Cavalheiro ve ark., 2021). Bu bulgu hattı, ekstrüzyon boncuklarının et ürünlerinde yalnızca taşıma değil, aynı zamanda proses koşullarına karşı koruma sağladığını vurgular.

Ekstrüzyonun et ürünlerinde bir diğer kritik avantajı, sinbiyotik tasarımlara uygun bir altyapı sunmasıdır. Naem gibi geleneksel fermente domuz sosisi modelinde probiyotik ve prebiyotik inülinin ekstrüzyon yöntemiyle birlikte mikroenkapsüle edilmesi, ürünün fonksiyonel bileşen yükünün artırılabilirliğini ve prebiyotik desteğin probiyotik performansını destekleyecek şekilde kurgulanabildiğini göstermiştir (Nyffenegger, 2018). Bu tür sinbiyotik

kapsüller, probiyotik hücreyi et matriksinin streslerinden yalıtırken, tüketim sonrası bağırsak ortamında metabolik avantaj yaratma hedefiyle de uyumlu bir strateji olarak değerlendirilebilir.

Mikroenkapsülasyonun et ürünlerinde “kalite” tarafına temas ettiği en görünür alanlardan biri aroma profilidir. Türk sucuğunda ekstrüzyon tekniğiyle mikroenkapsüle edilen *Lactobacillus rhamnosus*’un depolama sürecinde sucukta aroma özellikleriyle ilişkili değişimleri etkileyebildiği gösterilmiştir (Ünal Turhan ve ark., 2017). Bu sonuç, ekstrüzyon temelli kapsüllerin yalnız canlılığı koruyan pasif bir bariyer olmadığına, aynı zamanda probiyotik matriks içi davranışını daha öngörülebilir hale getirerek uçucu bileşik oluşum dinamikleri üzerinden duysal kaliteyi de dolaylı biçimde şekillendirebildiğine işaret eder. Buradan hareketle, et ürünlerinde probiyotik mikroenkapsülasyon tasarımında hedef yalnız yüksek canlılık değildir. Kapsül boyutu, duvar geçirgenliği ve ürün formülasyonu birlikte optimize edilmediğinde tekstürde tane hissi, görünümde heterojenlik veya aromada istenmeyen yönelimler görülebilir. Bu nedenle et ürünlerine yönelik mikroenkapsülasyon yaklaşımı, mikrobiyal stabilite ile ürün kalitesini aynı denklemde çözen bütüncül bir proses ve formülasyon tasarımı olarak ele alınmalıdır.

5. Sonuç

Fermente et ürünleri, fonksiyonel bileşenlerin taşınması açısından uygun bir platform gibi görünse de, matriksin çok bileşenli yapısı uygulamada önemli sınırlılıklar doğurur. Üretim basamakları ve depolama süreci boyunca oluşan asidik koşullar, oksijen teması, tuz yükü ve ısıl dalgalanmalar hem canlı kültürlerin canlılığını hem de antioksidanlar, polifenoller, vitaminler ve benzeri biyoaktif bileşenlerin kimyasal stabilitesini olumsuz etkileyerek hedeflenen fonksiyonel etkinliği azaltabilir. Bu nedenle yalnızca bileşenin ürüne ilavesi yeterli değildir. Bileşenin üretim ve depolama boyunca korunması ve tüketim sırasında biyoyararlanıma uygun biçimde sunulması gerekir.

Et teknolojisinde uygulanan mikroenkapsülasyon, bu gereksinimi karşılamak üzere katkı ilavesi yaklaşımını etkinliğin kontrollü yönetimi yaklaşımına dönüştürür. Taşıyıcı sistem, aktif bileşeni et matriksinin reaktif bileşenleriyle doğrudan temastan kısmen uzaklaştırarak kaybı yavaşlatır ve salınım kinetiğini daha öngörülebilir hale getirir. Elektrostatik ekstrüzyon gibi düşük sıcaklıkta yürütülebilen yöntemler canlı kültürlerin proses stresine maruziyetini azaltırken, koaservasyon temelli sistemler hassas biyoaktiflerin korunması ve kademeli salınımın kurgulanması açısından güçlü bir seçenek sunar. Böylece hedef, ürünü yalnızca fonksiyonel katkı içeren bir ürün haline getirmek değil, duysal kabulü ve ürün kalitesini koruyarak fonksiyonel etkinliği sürdürülebilir biçimde sağlamaktır. Bu çerçevede yöntem seçimi biyoaktif/probiyotik hedefi, uygulama biçimi (formülasyona katılım-yüzey/kaplama-

aktif ambalaj) ve proses yükü (fermantasyon/ısıtma/kurutma) dikkate alınarak yapılmalıdır.

Sonuç olarak mikroenkapsülasyon, et ürünlerinde probiyotiklerin canlılığını desteklemenin ötesinde, biyoaktif bileşenlerin stabilitesini güçlendirerek etki sürekliliğini artıran stratejik bir teknoloji olarak değerlendirilmelidir. Endüstriyel ölçekte doğru taşıyıcı seçimi, kapsül boyutu ve salınım tasarımı ile süreç koşullarının optimize edilmesi, inovatif ürün geliştirmeyi hızlandırırken kalite, güvenlik ve besleyici değer hedeflerinin birlikte karşılanmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Asres, Y., Hymete, A., Admassu, H., & Ayalew, A. (2025). Application of microencapsulated essential oil extracted from
- Baldin, J. C., Munekata, P. E. S., Michelin, E. C., Polizer, Y. J., Silva, P. M., Canan, T. M., ... Trindade, M. A. (2016). Effect of microencapsulated Jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract on oxidative stability and sensory properties of fresh pork sausage. *Meat Science*, 117, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.016>
- Baldin, J. C., Munekata, P. E. S., Michelin, E. C., Polizer, Y. J., Silva, P. M., Canan, T. M., ... Trindade, M. A. (2018). Effect of microencapsulated Jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) extract on quality and storage stability of mortadella sausage. *Food Research International*, 108, 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.076>
- Blaiotta, G., Murru, N., Di Cerbo, A., Romano, R., & Aponte, M. (2018). Production of probiotic bovine salami using *Lactobacillus plantarum* 299v as adjunct. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 2285–2294. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8717>
- Calderón-Oliver, M., Ponce-Alquicira, E., & Escalona-Buendía, H. B. (2025). Effects of microencapsulated natural preservatives on meat texture and consumer perception. *Journal of Texture Studies*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/jtxs.70008>
- Călinoiu, L.-F., Ștefănescu, B. E., Pop, I. D., Muntean, L., & Vodnar, D. C. (2019). Chitosan coating applications in probiotic microencapsulation. *Coatings*, 9(3), 194. <https://doi.org/10.3390/coatings9030194>
- Cavalheiro, C. P., Ruiz-Capillas, C., Herrero, A. M., & Pintado, T. (2021). Dry-fermented sausages inoculated with *Enterococcus faecium* CECT 410 as free cells or in alginate beads. *LWT - Food Science and Technology*, 139, 110561. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110561>
- Chávarri, M., Marañón, I., Ares, R., Ibáñez, F. C., Marzo, F., & Villarán, M. C. (2010). Microencapsulation of a probiotic and prebiotic in alginate-chitosan capsules improves survival in simulated gastro-intestinal conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 142, 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.06.022>
- Cook, M. T., Tzortzis, G., Charalampopoulos, D., & Khutoryanskiy, V. V. (2012). Microencapsulation of probiotics for gastrointestinal delivery. *Journal of Controlled Release*, 162(1), 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.06.003>
- dos Reis, A. S., Diedrich, C., de Moura, C., Pereira, D., de Flório Almeida, J., da Silva, L. D., ... Carpes, S. T. (2017). Physico-chemical characteristics of microencapsulated propolis co-product extract and its effect on storage stability of burger meat during storage at –15 °C. *LWT - Food Science and Technology*, 76, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.039>
- Encu, Ş. B., Acar Soykut, E., & Çakır, İ. (2025). Probiyotik, starter kültür ve bakteri-

- yofajlarda mikroenkapsülasyon tekniklerinin kullanımı ve güncel gıda uygulamaları. *GIDA*, 50(5), 929–945. <https://doi.org/10.15237/gida.GD25119>
- Genis, B., & Tuncer, Y. (2019). Probiyotik kültürlerin mikroenkapsülasyonunda kullanılan farklı kaplama materyalleri ve yöntemler. *GIDA*, 44(6), 1222–1236. <https://doi.org/10.15237/gida.GD19087>
- Gómez-Estaca, J., Comunian, T. A., Montero, P., & Favaro-Trindade, C. S. (2018). Physico-chemical properties, stability, and potential food applications of shrimp lipid extract encapsulated by complex coacervation. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1596–1604. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2116-3>
- Gómez, B., Barba, F. J., Domínguez, R., Putnik, P., Bursać Kovačević, D., Pateiro, M., Toldrá, F., & Lorenzo, J. M. (2018). Microencapsulation of antioxidant compounds through innovative technologies and its specific application in meat processing. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.10.006>
- Grujović, M. Ž., Semedo-Lemsaddek, T., & Marković, K. G. (2025). Application of probiotics in foods: A comprehensive review of benefits, challenges, and future perspectives. *Foods*, 14(17), 3088. <https://doi.org/10.3390/foods14173088>
- Hadian, M., Rajaei, A., Mohsenifar, A., & Tabatabaei, M. (2017). Encapsulation of *Rosmarinus officinalis* essential oils in chitosan–benzoic acid nanogel with enhanced antibacterial activity in beef cutlet against *Salmonella typhimurium* during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*, 84, 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.075>
- Heck, R. T., Lorenzo, J. M., Dos Santos, B. A., Cichoski, A. J., de Menezes, C. R., & Campagnol, P. C. B. (2021). Microencapsulation of healthier oils: An efficient strategy to improve the lipid profile of meat products. *Current Opinion in Food Science*, 40, 6–12. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.04.010>
- Jan, T., Negi, R., Hilal, A., Kaur, S., Kour, D., Khan, S. S., ... Ahmed, N. (2025). Microencapsulation techniques for probiotic formulations: Current scenario and future perspective. *Journal of Food Quality*, 2025, 6738124. <https://doi.org/10.1155/jfq/6738124>
- Koç, M., Sakin, M., & Kaymak-Ertekin, F. (2010). Mikroenkapsülasyon ve gıda teknolojisinde kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 77–86.
- Mehta, N., Kumar, P., Verma, A. K., Umaraw, P., Kumar, Y., Malav, O. P., ... Lorenzo, J. M. (2022). Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 12(3), 1424. <https://doi.org/10.3390/app12031424>
- Morsy, M. K., Mekawi, E., & Elsabagh, R. (2018). Impact of pomegranate peel nanoparticles on quality attributes of meatballs during refrigerated storage. *LWT - Food Science and Technology*, 89, 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.014>
- Neffe-Skocińska, K., Okoń, A., Zielińska, D., Szymański, P., Sionek, B., & Kołożyn-Krajewska, D. (2020). The possibility of using the probiotic starter culture *Lacti-*

- caseibacillus rhamnosus* LOCK900 in dry fermented pork loins and sausages produced under industrial conditions. *Applied Sciences*, 10(12), 4311. <https://doi.org/10.3390/app10124311>
- Nyffenegger, R. B. (2018). *Microencapsulation of probiotics and prebiotics (inulin) by using extrusion method and its application in Thai traditional pork sausage (Naem)* (Master's thesis). Assumption University.
- Pavli, F. G., Argyri, A. A., Chorianopoulos, N. G., Nychas, G. J. E., & Tassou, C. C. (2020). Effect of *Lactobacillus plantarum* L125 strain with probiotic potential on physicochemical, microbiological and sensorial characteristics of dry-fermented sausages. *LWT - Food Science and Technology*, 118, 108810. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108810>
- Pérez-Chabela, M. L., Lara-Labastida, R., Rodriguez-Huezo, E., & Totosa, A. (2013). Effect of spray drying encapsulation of thermotolerant lactic acid bacteria on meat batters properties. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1505–1515. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0865-y>
- Rajaei, A., Hadian, M., Mohsenifar, A., Rahmani-Cherati, T., & Tabatabaei, M. (2017). A coating based on clove essential oils encapsulated by chitosan–myristic acid nanogel efficiently enhanced the shelf-life of beef cutlets. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.10.005>
- Shanuke, D. S., Ranasinghage, N. B. D. P., Illippangama, A. U., Kulathunga, J., & Bandara, M. D. (2025). Co-encapsulation of probiotics and prebiotics: Techniques and applications in food fortification. *Food Science & Nutrition*, 13(6), e70426. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70426>
- Smaoui, S., Ben Hlima, H., Ben Braïek, O., Ennouri, K., Mellouli, L., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Recent advancements in encapsulation of bioactive compounds as a promising technique for meat preservation. *Meat Science*, 181, 108585. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108585>
- Soyuçok, A., Kılıç, B., & Başyigit Kılıç, G. (2019). Et ürünlerinde enkapsülasyon teknolojisinin kullanımı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 102–110. <https://doi.org/10.29048/makufebd.530102>
- Su, L., Nian, Y., & Li, C. (2023). Microencapsulation to improve the stability of natural pigments and their applications for meat products. *Food Materials Research*, 3, 10. <https://doi.org/10.48130/FMR-2023-0010>
- Surendhiran, D., Cui, H., & Lin, L. (2019). Encapsulation of phlorotannin in alginate/PEO blended nanofibers to preserve chicken meat from *Salmonella* contaminations. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100346. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100346>
- Surendhiran, D., Li, C., Cui, H., & Lin, L. (2020). Fabrication of high stability active nanofibers encapsulated with pomegranate peel extract using chitosan/PEO for meat preservation. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100439. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100439>
- Szpicer, A., Bińkowska, W., Stelmasiak, A., Wojtasik-Kalinowska, I., Czajkowska, A.,

- Mierzejewska, S., ... Półtorak, A. (2025). Innovative microencapsulation techniques of bioactive compounds: Impact on physicochemical and sensory properties of food products and industrial applications. *Applied Sciences*, 15(22), 11908. <https://doi.org/10.3390/app152211908>
- Topcam, M. M. Y., Arslan, B., & Soyer, A. (2024). Sucuk, Turkish-style fermented sausage: Evaluation of the effect of bioprotective starter cultures on its microbiological, physicochemical, and chemical properties. *Applied Microbiology*, 4(3), 1215–1231. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4030083>
- Torab, M., Basti, A. A., & Khanjari, A. (2017). Effect of free and nanoencapsulated forms of *Zataria multiflora* Boiss essential oil on some microbial and chemical properties of beef burger. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 9(2), 93–102.
- Tutun, S., & Yurdakul, Ö. (2022). Enkapsülasyon ve gıda teknolojisinde kullanımı. *Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni*, 13(2), 99–119. <https://doi.org/10.38137/vftd.1096571>
- Ünal Turhan, E., Erginkaya, Z., & Selli, S. (2017). The effect of microencapsulated *Lactobacillus rhamnosus* and storage period on aroma properties of Turkish dry-fermented sausage (sucuk). *Food Measurement and Characterization*, 11, 2131–2141. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9597-z>