

**Editör
TAHIR YÜCEL**

BIDGE



BIDGE

BİDGE Yayınları

Gıda Bilimi ve Teknolojisinde Güncel Yaklaşımlar

Editör: TAHİR YÜCEL

ISBN: 978-625-8567-15-1

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Gıda endüstrisi, artan dünya nüfusu, değişen tüketici beklentileri, iklim değişikliği ve küresel gıda güvenliği sorunları doğrultusunda hızla dönüşen ve disiplinler arası yaklaşımlara her zamankinden daha fazla ihtiyaç duyan bir alan hâline gelmiştir. Bu dönüşüm sürecinde, yenilikçi teknolojiler, biyoteknolojik uygulamalar ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları; gıdanın güvenli, kaliteli ve erişilebilir olmasını sağlamada kritik bir rol üstlenmektedir. Bu kitap, gıda bilimi ve teknolojisi alanında güncel ve stratejik öneme sahip konuları bir araya getirmektedir.

Kitapta yer alan bölümler; nanoteknolojinin dezenfeksiyon ve ambalajlama sistemlerindeki uygulamalarından mikrobiyal kökenli biyokatalizörlere, iklim değişikliğinin su kaynakları ve sağlıklı beslenme üzerindeki etkilerinden elektroegirme teknolojisinin gıda güvenliğindeki kullanım alanlarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Ayrıca süt ve süt ürünleri teknolojisinde ekzopolisakkaritlerin fonksiyonel rolü, alternatif protein kaynakları arasında yer alan tek hücreli proteinler, et ve et ürünlerinde ambalajlama yaklaşımlarının kalite ve raf ömrü üzerindeki etkileri, zeytin atıklarının biyobozunur ambalajlara dönüştürülmesi ve fonksiyonel gıda olarak arı ürünlerinin biyoaktif özellikleri ele alınmaktadır.

Bu kitabın hazırlanmasında bilimsel katkılarından dolayı emeği geçen tüm yazarlara ve BİDGE yayınları çalışanlarına teşekkür eder; eserin, gıda bilimi ve teknolojisi alanında çalışan tüm paydaşlar için yol gösterici ve ilham verici bir kaynak olmasını temenni ederim.

Dr. Öğr. Üyesi Tahir YÜCEL

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

EKZOPOLİSAKKARİTLERİN SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI	1
---	---

OSMAN EREN

MİKROBİYAL LİPAZLAR: GIDA ENDÜSTRİSİNE YÖNELİK BİYOKATALİZÖRLER	30
--	----

EDA ÖNDÜL KOÇ

GIDA ENDÜSTRİSİNDE DEZENFEKSİYON YÖNTEMİ OLARAK NANOTEKNOLOJİNİN KULLANIMI	49
---	----

Abdullah demirci

GIDA GÜVENLİĞİ ALANINDA ELEKTROSPİNNİNG UYGULAMALARI	63
---	----

FİDAN ÖZGE TIKILOĞLU

FONKSİYONEL GIDA OLARAK ARI ÜRÜNLERİ VE BİYOAKTİF ÖZELLİKLERİ	84
--	----

DAVUT KARAHAN

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, SU KAYNAKLARI VE SAĞLIKLI BESLENME	101
--	-----

EZGİ KURTULMUŞ, TÜLAY ELAL MUŞ

MICROBIAL PROTEINS (SINGLE CELL PROTEINS)	119
---	-----

PINAR ŞEKERCİ KELEŞ

ET VE ET ÜRÜNLERİNDE RAF ÖMRÜ VE AMBALAJLAMA STRATEJİLERİ: GELENEKSEL SİSTEMLER VE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR	142
--	-----

NURSEL SÖYLEMEZ MİLLİ, ŞEHRİBAN OĞUZ

GIDA AMBALAJLAMA SİSTEMLERİNDE GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİ: ANTİBAKTERİYEL MEKANİZMALAR VE GÜVENLİK BOYUTU	162
---	-----

ŞEHRİBAN OĞUZ

İÇİNDEKİLER

ZEYTİN ATIKLARININ BİYOBOZUNUR AMBALAJLARA DÖNÜŞMESİ	189
<i>FULYA HARP ÇELİK</i>	
BİTKİSEL SÜT ÜRÜNLERİ: ÜRETİM TEKNOLOJİSİ, FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ	208
<i>MERVE KANDİL</i>	
EFFECT OF MICROENCAPSULATING MIXTURES ON THE ENCAPSULATION EFFICIENCY	221
<i>FURKAN HAYTAOĞLU, ZEYNEP YILDIRIM, FİRUZE ERGİN ZEREN, AHMET KÜÇÜKÇETİN</i>	

BÖLÜM 1

EKZOPOLİSAKKARİTLERİN SÜT VE SÜT ÜRÜNLERİ TEKNOLOJİSİNDE KULLANIMI

OSMAN EREN¹

Giriş

Ekzopolisakkaritler (EPS), bakteriler başta olmak üzere çeşitli canlılar tarafından sentezlenen kompleks organik moleküllerdir. Polimerik özelliğe sahip bu biyomoleküllerin esas fonksiyonu bariyer görevi görerek uygun olmayan çevre koşullarına ve fagositoza karşı korumaktır. EPS'ler aynı zamanda biyofilmlerin esas yapısal bileşeni olup lineer veya dallı konfigürasyonda olabilirler. EPS matriksinin temel iskeleti monosakkarit birimlerinin tipik bir kondesasyonu olmakla birlikte; fosfolipitler, proteinler ve çeşitli organik asitler gibi farklı biyomolekülleri de kapsayarak daha kompleks bir yapı haline gelebilir. Bu çok bileşenli ve kompleks biyomakromoleküller, sahip oldukları özgün biyokimyasal ve fonksiyonel özellikler sayesinde gıda, tıp, eczacılık, tekstil, kozmetik ve plastik endüstrilerinin yanı sıra çeşitli biyoteknolojik uygulamalarda da geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. EPS'ler gıda endüstrisi ve biyoteknolojisinde emülgatör, su bağlayıcı, viskozite düzenleyici ve koruyucu ajan olarak işlev görmektedir.

¹ Dr, Hazine ve Maliye Bakanlığı-Ağrı Defterdarlığı, Orcid: 0000-0002-2016-7671

Bunun yanı sıra, EPS'ler antitümör, antioksidan, antimikrobiyal, immünomodülatör, prebiyotik, postbiyotik ve antienflamatuvar aktiviteleri sayesinde insanlar ve hayvanlar için fizyolojik yararlar sergilemektedir (İspirli & Dertli 2018).

Ekzopolisakkaritlerin Yapısı

Ekzopolisakkaritler (EPS), başta bakteriler ve bitkiler olmak üzere çeşitli canlı organizmalar tarafından sentezlenen ve yapısal olarak ağırlıklı şekilde monosakkarit ünitelerinden oluşan selüloz, nişasta, pektin, aljinat gibi biyopolimerik komplekslerdir (Soyuçok & ark., 2016, Eren & ark., 2025). EPS'lerin kimyasal yapısı yalnızca şeker bileşenleriyle sınırlı olmayıp N-asetilglukozamin, N-asetilgalaktozamin gibi sakkarit türevlerinin yanı sıra asetat, propiyonat, gliserat, pirüvat, süksinat ve çeşitli aminoasitleri de içerebilir. EPS'ler yapısal çeşitliliğe göre iki ana gruba ayrılmaktadır: Yapısında yalnızca tek tip monosakkarit içerenler homopolisakkaritler (HoPS) ve birden fazla tipte şeker birimi içerenler ise heteropolisakkaritler (HePS) olarak sınıflandırılmaktadır. Bakteriler tarafından sentezlenen ekzopolisakkaritler, üretici mikroorganizmalara çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklılık sağlama başta olmak üzere çeşitli fizyolojik avantajlar sunmaktadır (Eren & Şakiroğlu, 2025; Ergene & Avcı, 2015).

Ekzopolisakkaritlerin İşlevi

EPS'ler sahip oldukları özgün kimyasal özellikleri sayesinde başta gıda endüstrisi olmak üzere tıp, farmakoloji ve biyoteknoloji gibi birçok alanda farklı uygulama potansiyeline sahiptir. Gıda sektöründe genellikle su tutucu, kıvam arttırıcı ya da emülgatör gibi özellikleri nedeniyle tercih edilen EPS'ler aynı zamanda antimikrobiyal, antitümör ve antioksidan gibi biyolojik aktiviteler de sergileyebilmektedir (Kaur & Dey, 2023; Nwodo & ark., 2012). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) gıda emülgatörleri için

uzun dönem sağlık etkilerinin araştırılması gerektiğini bildirmiştir. Emũlgatũr, bir gıda ũrũnũnde iki veya daha fazla fazla fazın homojen şekilde emũlsiyonunu oluşturan ve gıdada lezzet değişimini sağlayan, doku iyileştirmesine katkıda bulunan, stabiliteyi ve raf ũmrũnũ uzatan maddeler olarak tanımlanmaktadır (*Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Mũdũrlũđũ*, 2013). Etkili bir emũlgatũr, 24 saat sonra başlangıç emũlsiyon hacminin en az yarısını korumalıdır (Willumsen & Karlson, 1996). EPS'lerin sentetik emũlgatũrlere karşı ũstũnlũđũ onları daha da cazip kılmaktadır. Örneğin, doğada biyobozunur ũzellikli bir ũrũn olmasđ, dũřũk bir toksisiteye sahip olmasđ ve canlı fizyolojisi ile olan biyolojik uyumu gibi ũnemli faktũrlerde sentetiklere nazaran daha avantajlı olmaları, onları iyi bir alternatif haline getirmektedir (Mata & ark., 2008; Freitas & ark., 2011; Sorensen & ark., 2022; Xiao & ark., 2022).

Yapılan çalışmalardan elde edilen verilere gũre karboksimetil selũloz, polisorbitat-80, gliserol oleat, maltodekstrin, sorbitan monostearat gibi sentetik olarak ũretilen çok çeişitli emũlgatũrlerin bağırsak mikrobiyomuna zarar verdiği, intestinal mukozal bariyer enflamasyonuna ve mikrobiyota kompozisyonu değişimine neden olduğu rapor edilmiştir. Mukozal bariyerin bozulmasđ ũlseratif kolit ve kolon karsinomu riskini de arttırmaktadır (Chassaing & ark., 2015; Afonso & ark., 2016; Yao & ark., 2019; Miclotte & ark., 2020; Naimi & ark., 2021). Bu olumsuz tablo karşısında ũzellikle Genel Olarak Gũvenilir Kabul Edilen (GRAS) sınıfına dahil olan bakterilerden elde edilecek emũlgatũrler pozitif bir katkı sağlayabilir.

Doğal olmayan katkı maddelerine karşın uygun bir alternatif olarak EPS'ler son yıllarda umut vadetmektedir. İster fermente isterse fermente olmayan gıda olsun, EPS'ler tũm gıda tiplerinde kullanılabilir. EPS'nin gıda bileşeni olarak kullanılması hem gıdanın korunmasında hem de metabolizmadaki biyofonksiyonelliği nedeniyle tercih edilebilir. Probiyotik ũzellikli bakterilerin ũretdiđi oldukları EPS'ler GRAS çok işlevli post-biyotik yeteneklere sahip

polisakkaritler olarak sınıflandırılabilir (Pourjafar & ark., 2023). Gıda endüstrisi dahil olmak üzere birçok farklı alanda EPS'lere talep oldukça artmaktadır; fakat EPS üretiminde en önemli problem maliyet ve verimlilik problemidir. Bu sebeple daha verimli ve ekonomik EPS üretimi için yeni çeşitli mühendislik stratejilerine gereksinim duyulmaktadır (Patel & ark., 2010). Yerinde üretim, önerilen bu mühendislik stratejilerinden biri olabilir (Ryan & ark., 2015).

EPS'nin, antimikrobiyal, immünomodülatör, antiinflamatuvar, antioksidan, antitümör, antiviral, antidiyabetik, antiülser ve kolesterol düşürücü gibi çeşitli terapötik etkilerinin olduğu rapor edilmiştir (Angelin & Kavitha, 2020). Dolayısıyla EPS'nin bu belirtilen özellikleri sayesinde daha sağlıklı ve fonksiyonel gıda elde etmek mümkündür. EPS'lerin süt ürünleri ve fırıncılık ürünleri başta olmak üzere birçok farklı gıda alanında kullanılma potansiyeli gittikçe önem kazanmaktadır. Ayrıca yenilebilir ambalaj dahil olmak üzere farklı amaçlar için kullanılabilme potansiyeli taşıyan EPS'ler için son çalışmalar nutrasötik etkilerinin de olabileceğini göstermiştir. Çok farklı alanlarda geniş bir kullanım potansiyeli barındıran EPS'ler için klinik seviyede de araştırmaların sistematik bir şekilde yapılması gerekmektedir (Pourjafar & ark., 2023).

Ekzopolisakkarit Kullanımının Süt Ürünlerindeki Uygulamaları

EPS'lerin yoğurdun tekstürel ve fonksiyonel özelliklerini geliştirebileceği ve ayrıca prebiyotik ve antioksidan özellikler sergileyebileceği belirtilmiştir. Bu sonuç bağlamında, yapılan araştırmalar doğal olarak süt ürünlerinde EPS oluşturan bakterilerin endüstriyel EPS üretiminde veya süt ürünleri başta olmak üzere gıdaların çeşitli özelliklerini geliştirme amacıyla kullanılması olarak dahilindedir (Tiwari & ark., 2021).

Çin'in Sincan bölgesinden alınan süt örneklerinden yoğurt yapan araştırmacılar sütte bulunan *Lactobacillus helveticus* MB2-1'in EPS ürettiğini ve EPS'nin HePS yapısında olduğunu rapor etmişlerdir. Araştırmacılar EPS'nin yoğurdun reolojik özelliklerine, viskozitesine ve genel kabul edilebilirliğine pozitif katkı sağladığını, katı bir yapının oluştuğunu ve su tutma kapasitesinin arttığını bildirmişlerdir. Bütün bu sonuçlardan hareketle bu suşun yoğurt yapımında probiyotik suş olarak kullanılabilceği rapor edilmiştir (Ge & ark., 2022). *L. helveticus*'un GRAS statüsüne sahip olması nedeniyle bu suşun üretmiş olduğu metabolitlerin de daha güvenli olabileceği düşünüldüğünde EPS üretiminde güvenli kullanıma ihtimali mevcuttur. Probiyotik özellik taşıyan *Lactobacillus casei* Zhang suşu başlangıç kültürü olarak yoğurt yapımında kullanılmıştır. Bu bakteriyi içeren yoğurdun daha yüksek bir elastikiyet indeksine ve daha düşük katı-sıvı dengesine sahip olduğu belirlenmiştir. EPS'nin yoğurda kohezif ve viskoz özellikleri yönünden pozitif katkı sağladığı; fakat sertlik, kıvam ve su tutma kapasitesi yönünden anlamlı bir fark oluşturmadığı da rapor edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde probiyotik Zhang suşu içeren yoğurdun hem depolamanın başında hem de depolama sonrasında daha fazla EPS içerdiği belirlenmiştir (Bai & ark., 2020). Yapılan bir çalışmada araştırmacılar bitkisel fermente bir üründen *Lactobacillus plantarum* RS20D suşu izole etmişlerdir. Suşun asidik karakterli HePS yapısında EPS ürettiği ve moleküler ağırlığının 1.69×10^6 Da olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar RS20D suşunun yoğurt dokusunu önemli ölçüde iyileştirebileceğini, sinerezis'i azaltabileceğini ve bu olumlu katkının EPS üretimiyle alakalı olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmanın sonucuna göre EPS'nin immünostimülan ve proinflamatuvar etkilere sahip olabileceği fakat bu EPS'nin klinik olarak etkin olup olmadığının ve süt ürünlerinde RS20D'nin kültür olarak kullanılıp kullanılamayacağının belirlenmesi için daha fazla *in vivo* çalışmanın gerektiği rapor edilmiştir (Zhu & ark., 2019).

Streptococcus thermophilus DGCC7785 ve *S. thermophilus* St-143 suşlarının farklı karakterde EPS ürettikleri bilinmektedir. Bu bakteri yoğurt bakterisi olarak bilinir ve bu farklı suşların ürettiği EPS'lerin yoğurt üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada her iki suşun EPS üretiminin pH düşüşü ve sıcaklık değişimi ile pozitif korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. Sıcaklığın bir diğer etkisi de EPS moleküllerinin kütlesi üzerine olmuştur. Bir suşta sıcaklık molar kütleyi değiştirirken diğer suşta değişimin olmadığı belirlenmiştir. EPS miktarı, sütün jelleştiği pH ve jel stabilitesi üzerine de etkin olmuş olup st-143 tarafından oluşturulan jellerin daha zayıf olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar EPS üretiminin ise 70 ve 178 mg/L olduğunu rapor etmişlerdir (Khanal & Lucey, 2018). Bu düzeyde bir üretim endüstriyel olarak yetersiz olmakla beraber yerinde üretim bağlamında gıdaya pozitif katkılar sağlayabilir. Ayrıca sıcaklığın her iki suşun ürettiği EPS'yi aynı şekilde etkilememesi her EPS ve suşun kendi koşulları çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapılan bir araştırmada yoğurt bakterisi olan *Streptococcus thermophilus* S-3 suşu yoğurt üretimi için kullanılmıştır. Çalışmanın neticesine göre yoğurtta S-3'ün ürettiği EPS'nin HePS yapısında olduğu, glukoz ve galaktoz içerdiği, α -1,6 yan bağ oluşturduğu ve ana zincirde α -1,3 ve α -1,4 bağlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada S-3'ün yerinde üretim için kullanımının su tutma kapasitesi ve sinerezis üzerine olumlu katkı yapacağı da rapor edilmiştir (Xu & ark., 2021). Araştırmacılar lahana turşusundan EPS üreten bir suş olan *Levilactobacillus brevis* HDE-9'u izole etmişlerdir. Üretilen EPS'nin verimi 48.67 ± 1.83 mg/mL olduğunu gösteren çalışmada bu EPS'nin salt glukozdan oluştuğu belirlenmiştir. Bu düzeyde bir verim endüstriyel üretim için uygun olmasa da yüzeyinin düz ve kompakt olduğunun anlaşılması onu gıda kaplama ve plastikleştirilmiş filmler için iyi bir potansiyel aday yapabilir. HDE-9'dan elde edilen EPS'nin hidrofilik özelliğinin yüksek olduğunu da belirleyen araştırmacılar, su tutucu filmlerde ve

doğa ile uyumlu plastikleştirilmiş filmlerin hazırlanmasında ham madde olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Termal kararlılığı yüksek olan bu EPS'nin aynı zamanda iyi bir yoğurt yapmak için başlangıç kültürü olarak da kullanılabileceği belirtilmiştir; çünkü yapılan analizler sonucu HDE-9 EPS'nin iyi bir su tutucu olduğu, iyi bir katılaştırıcı olduğu ve emülsifikasyon yeteneğinin iyi olduğu rapor edilmiştir (Du & ark., 2022). *Lactiplantibacillus plantarum* probiyotik olarak kullanılabilen ve süttten fermente yoğurtlar üretebilme yeteneğine sahip bir bakteridir. Bu bakterinin metabolitleri hem antioksidan hem de antimikrobiyal özelliklere sahip olup aynı zamanda bakteri EPS'de üretebilmektedir. Araştırmacılar *L. Plantarum* LCC-605 kullanarak yağsız süttten yoğurt üretmişlerdir. Çalışmanın neticesine göre bu bakterinin başlangıç suşu olarak kullanılması yoğurdun su tutma kapasitesini ve yoğurdun dokusunu anlamlı olarak iyileştirmiştir (Yang & ark., 2025). Araştırmacılar geleneksel Yak yoğurdundan yeni bir *Streptococcus thermophilus* suşu olan ZJUIDS-2-01'i izole edip bu suşun üretmiş olduğu EPS-3A'nın yapısını ve etkilerini analiz etmişlerdir. Elde edilen EPS'nin moleküler ağırlığının 1380 kDa olduğunu belirten araştırmacılar ayrıca EPS'nin HePS yapısında olduğunu rapor etmişlerdir. Yüksek moleküler ağırlık, gıdada daha iyi bir ağız hissi oluşturma ve daha viskoz bir ürün meydana getirme potansiyeli taşır. Yapılan çalışmada özellikle zeytinyağı ve üzüm çekirdeği yağında bu EPS'nin güçlü bir emülsifiyer olduğu belirlenmiş olup ayrıca biyoflokülan olarak da kullanılma potansiyeli olduğu rapor edilmiştir (Cao & ark., 2021).

Yapılan bir başka önemli çalışmada da araştırmacılar her üçü de HePS olan yüksek moleküler ağırlıklı EPS-LH43, orta moleküler ağırlıklı EPS-LH13 ve düşük moleküler ağırlıklı EPS-LH23 isimli üç farklı EPS'nin yoğurttaki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan analizler neticesinde LH43'ün ilave edildiği yoğurdun; kohezif özelliğinin, su tutma kapasitesinin, zeta potansiyelinin, viskoz

özelliğinin, G' ve G'' değerlerinin diğer iki EPS ilave edilen yoğurttan daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yapılan lezzet testine göre de EPS-LH43 en çok tercih edilen yoğurt olmuştur. Bu sonuçlardan hareketle araştırmacılar yüksek molekül ağırlığa sahip LH43'ün yerinde üretim olarak yoğurt üretiminde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu üç farklı EPS'de üç farklı *Lactobacillus helveticus*'un suşundan elde edilmiştir (Zhang & ark., 2024).

Fermente bir süt içeceği olan Wara'dan *Pediococcus acidilactici* suşu izole eden araştırmacılar bu bakterinin EPS üretim yeteneklerini araştırmışlardır. Üretilen EPS'nin HePS yapısında olduğu ve en yüksek glukoza, en düşük inositol olmak üzere farklı oranlarda çeşitli monosakkaritler içerdiği belirlenmiştir. Yapılan *in vitro* çalışma neticesinde EPS'nin DPPH radikal temizleme aktivitesi, ferrik iyon indirgeme özelliği ve toplam antioksidan kapasitesinin güçlü olduğu belirlenmiştir (Adebayo-Tayo & ark., 2024). Kefirden *Leuconostoc mesenteroides* XR1 suşunu izole eden araştırmacılar bu suşu başlangıç kültürü olarak yoğurt yapımında kullanmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, EPS sayesinde yoğurdun; su tutma kapasitesinin arttığı, daha yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu ve daha kararlı reolojik özellikler kazandığı belirlenmiştir. Araştırmacılar elde edilen EPS'nin asidik bir HePS olduğunu ve yapısında glukoza ve glukuronik asit olduğunu bildirmişlerdir (Tian & ark., 2024). Yoğurdun depolama, taşıma ve dağıtım esnasında dış kuvvetlere maruz kalmasıyla istenmeyen reolojik yapılar meydana gelebilir. G' yoğurdun jel özelliklerini yansıtır ve elastik deformasyona karşı direncin ölçüsü iken G'' ise örneğin viskozitesini yansıtır (Wang & ark., 2023). Yukarıda belirtilen çalışma neticesinde hem G' hem de G'' 'nın yükselen bir eğilim gösterdiği ve yoğurdun daha düzenli bir polimer yapısına ve daha güçlü bir kohezyona sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca EPS verimi süt ortamında 12.13 g/L olduğu belirlenmiştir (Tian & ark.,

2024). Bu çalışmanın verimi oldukça yüksektir. Birçok bakteri EPS üretse de ticari olarak etkin ve verimli bir düzeye erişmek oldukça zordur. Ayrıca yüksek verimle EPS üreten suşların güvenilir olması ve toksikojenik olmaması gerekir. Bu bağlamda *L.mesenteroides*'in GRAS statüsünde olması bu çalışmayı ve bu suşu endüstriyel üretim için oldukça değerli hale getirebilir.

Ekzopolisakkarit Kullanımının Geleneksel Süt Ürünlerindeki Uygulamaları

EPS'nin Ayran Üzerindeki Uygulamaları

Ayran, yoğurttan yapılan geleneksel bir Türk içeceğidir. Endüstriyel olarak ayran üretimi süte uygun starter kültürlerin eklenmesiyle yapılır. EPS üreten suş ilavesinin ayranın teknolojik ve organoleptik etkilerinin incelendiği bir araştırmada araştırmacılar, EPS üretiminin ayranın viskozite başta olmak üzere reolojik özelliklere pozitif katkılar sağladığını belirtmişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuca göre de suş farklılığının EPS verim ve yapısını değiştirdiği ve bunun da ayranın fizikokimyasal özelliklerine farklı şekilde yansıdığı belirlenmiştir (Yılmaz & ark., 2015). Bu çalışmadan elde edilen sonuca göre EPS her suş; hatta besi ortamından etkilenip değişiklik göstermekte ve gıda üzerine etkileri farklı olmaktadır. Bu durum, EPS-gıda etkileşiminin oldukça dinamik olduğunu ve her EPS bağlamında etkilerinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapılan bir çalışmada starter kültür tiplerinin ve inkübasyon sıcaklığının ayranın fiziksel özelliklerini etkilediği belirlenmiştir. Inkübasyon sıcaklığının düşmesi EPS miktarında artışı sağlarken buna bağlı olarak sinerezis değerleri, tane sayısı ve görsel pürüzlülük değerlerinde azalma olduğu rapor edilmiştir. Ayran ölçüm sıcaklığının da ayranın reolojik özellikleri etkilediği, sıcaklık arttıkça görünür viskozite ve kıvam katsayısının düştüğü belirtilmiştir (Ergin 2021). Yapılan bir araştırmada ekzopolisakkarit üreten suşların ayranın fizikokimyasal ve biyoteknolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde

edilen sonuca göre EPS üreten suş kullanımı ayran örneklerinde peynir altı suyu ayrışmasını azaltmış ve viskozite ile duyuşal özelliklere pozitif katkı sağlamıştır. Peynir altı suyu ayrışmasının azalması depolama sürecinin uzamasına katkıda bulunur (Sahan & ark., 2006). Endüstriyel üretimde en önemli problemlerden biri de depolama esnasında meydana gelen sorunlardır. Depolarda meydana gelen kayıplar önemli bir ekonomik ve çevresel sorundur. Bu bağlamda depolama esnasında meydana gelecek problemleri en aza indirmek ekonomik ve çevresel sorunlara pozitif katkılar sağlar. Yukarıdaki çalışmanın neticesine göre peynir, depolamada önemli bir sorun olan peynir altı suyu ayrışmasının azalması bu çalışmayı önemli kılmaktadır.

EPS'nin ayran üzerine etkilerini inceleyen çalışmalara baktığımızda genel olarak viskoz özellik başta olmak üzere EPS'nin ürünün organoleptik ve reolojik özelliklerine pozitif katkılar sağladığı görülmektedir. Ancak bu etkiler her suşa; hatta her farklı inkübasyon koşulunda değişmektedir. Bu durum, EPS'nin etkisinin dinamik olduğunu ve genel etkilerinin ayrıntılı ve net şekilde belirlenebilmesi için daha fazla çalışmaya gereksinim olduğunu göstermektedir.

EPS'nin Yoğurt Üzerindeki Uygulamaları

Yapılan bir araştırmada mikrobiyal transglutaminaz enzimi ile EPS üreten ve üretmeyen farklı suşlar, yoğurt yapımında başlangıç kültürü olarak kullanılmıştır. Yapılan analizde EPS üreten suş kullanımının görünüm ve kıvam gibi yoğurdun organoleptik özelliklerine pozitif katkılar sağladığı rapor edilmiştir (Bulca & ark., 2023). Nitekim yapılan farklı çalışmalarda da EPS'nin yoğurdun besinsel ve teknolojik özelliklerine olumlu katkı sağladığı rapor edilmiş olup yeni starter kültür olarak EPS üreten suşların kullanılma potansiyeli olduğu rapor edilmiştir (İspirli & Dertli, 2018; Dikmen & ark., 2023). Fakat Bulca & ark, (2023) yaptıkları çalışmada EPS

üreten suşun tat ve koku gibi yoğurdun duyuşal özelliklerine negatif olarak etki ettiği belirtilmiştir. Yapılan bir başka araştırmada yoğurtta EPS üreten bir suş kullanılıp EPS'nin karakterizasyonu yapılmıştır. Sonuçlara göre EPS'nin HePS yapıda olduğu, termal kararlılığa sahip olduğu ve psödoplastik davranışlar sergilediği belirlenmiştir. Diğer çalışmalarla paralel olarak EPS'nin gıda endüstrisinde koyulaştırıcı ajan, antibiyofilim materyali ve antioksidan olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir (Özdemir, 2023). Yapılan bir çalışmada yoğurtta EPS üreten suşun tat, doku ve genel kabul edilebilirlik açasından üretmeyen suşa göre daha iyi sonuçlar aldığı; fakat önemli biyoaktif maddeler olan fenolik içerik ve mikrobiyal stabilite yönünden EPS üreten suşun daha zayıf performans sergilediği rapor edilmiştir (Özer, 2024).

EPS'nin Peynir Üzerindeki Uygulamaları

Yapılan bir çalışmada EPS üreten starter kültürler kaşar peynir üretiminde kullanılmıştır. EPS üreten suşun kontrol peynirinin tekstürüne yakın bir tekstür sağladığı; fakat EPS'nin nem içeriğini arttırdığı ve bunun da peynirde tat ve yapı kusurlarına neden olduğu rapor edilmiştir (şanlı & ark., 2018). Gıdanın nem içeriği mikrobiyal bozulma için hayati öneme sahiptir. Peynir gibi proteince oldukça zengin ve besleyici hayvansal bir ürünün nem içeriğinin artması mikrobiyal bozulma riskini arttırabilir. Dolayısıyla bu çalışmada nem içeriğinin artmış olması EPS'nin negatif etkilerinin de olabileceği göstermektedir. Bu sonuç çerçevesinde daha etkin ve zarar potansiyeli düşük EPS üretimlerinin yapılması gerektiği değerlendirilmektedir. Yapılan bir çalışmada beyaz peynirden EPS üreten suşlar izole eden araştırmacılar EPS'nin üretim miktarlarının 59-255 mg/mL arası olduğunu bildirmişlerdir. Yapılan bir diğer çalışmada ise peynirde EPS üreten suşlar kullanılmış olup bu suşların 72-359 mg/L arasında EPS ürettikleri belirlenmiştir (Darılmaz & Gümüştekin, 2012; Yüksekdağ & ark., 2021). Endüstriyel üretim olarak bu EPS üretim miktarları yetersiz olsa da

yerinde üretim olarak gıdanın çeşitli özelliklerine katkı sunabilir. Başka bir çalışmada, araştırmacılar ev yapımı Türk peynirinden *Lacticaseibacillus rhamnosus* ACS5 suşunu izole etmiş ve bu bakterinin ekzopolisakkarit (EPS) ürettiğini rapor etmiştir. Elde edilen EPS'nin daha önce tanımlanmamış bir yapıya sahip olduğu belirtilmiş, ayrıca bu biyopolimerin yüksek antioksidan ve antidiyabetik aktivite göstermesinin yanı sıra DNA hasarını onarıcı özellikler sergilediği bildirilmiştir (İnanan & ark., 2024).

Araştırmacılar tam yağlı ve yarım yağlı tulum peynirlerinde EPS üreten suşun etkinliğini incelemişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde EPS'nin yağ asidi kompozisyonunu değiştirmedeği ve yağ asidi miktarında düşüşe sebep olduğu belirlenmiştir (Oluk & Güven, 2015).

EPS'nin Tereyağı Üzerindeki Uygulamaları

Yapılan bir araştırmada tereyağında EPS üreten suşlar starter kültür olarak kullanılmış olup EPS'nin tereyağının, yağ asidi, yağ oranı, yağsız kuru madde oranı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı rapor edilmiştir (Akgül, 2020).

Bu sonuç EPS'lerin her zaman arzu edilen sonuçları sağlamayacağı ve etkin bir sonuç için suş değişiminden EPS değişimine kadar tüm faktörlerin değerlendirilmesi ve tekrar çalışılması gerektiğini göstermektedir. Hem ülkemizde hem de uluslararası literatür incelendiğinde EPS'nin tereyağı üzerindeki etkilerinin neler olduğu hakkında son derece sınırlı çalışmalar bulunmaktadır. Bu konuda daha kapsamlı, sistematik ve ileri araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

EPS'nin Dondurma Üzerindeki Uygulamaları

Yapılan bir çalışmada, dondurma üretiminde kullanılan EPS üreten suşun ürünün kuru madde içeriğinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişiklik sağlamadığı belirlenmiştir. Buna karşın, aroma üretme yeteneğine sahip suşun daha yüksek titrasyon asitliği ve daha

düşük pH değeri sağladığı tespit edilmiştir. Çalışmada genel olarak EPS üreten suş kullanımının aroma veren suş kullanımına göre dondurmanın özelliklerine daha pozitif katkılar sağladığı ve genel kabul edilebilirlik puanının daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Yaşar & Yeydem, 2023). Bu çalışmada hem EPS üreten hem de aroma profili geliştiren suşların yüksek titrasyon asitliği değerlerine ve düşük pH seviyelerine sahip olmaları, dondurmaya mikrobiyal stabilite açısından olumlu katkılar sağlamakla birlikte; tat ve aroma özellikleri bakımından tüketici beğenisini olumsuz yönde etkileyebileceği değerlendirilmiştir. Stabilizatörler, dondurmada viskoz sağlayıcı, havalandırma iyileştirici, kriyoproteksiyon gibi işlevleri kontrol etmek amacıyla kullanılır (Bahramparvar and Tehrani, 2011). Araştırmacılar, EPS üreten suş kullanarak stabilizatör kullanımına ihtiyaç duymayan fermente bir dondurma üretimini hedef almışlardır. Çalışmada EPS üreten *Streptococcus thermophilus* suşlarını kullanan araştırmacılar bu suşların EPS üretmelerinden dolayı dondurma yapımında koyulaştırıcı ve jelleştirici suş olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Dertli & ark., 2016).

Dondurmada overrun değeri hava artış oranı demek olup maliyet ve lezzet açısından önemlidir. Yüksek artış oranı maliyeti düşürürken gereğinden fazla olması halinde tat ve aromada istenilmeyen durumlara yol açar. Yapılan bir araştırmada dondurma yapımında kefir suşlarını kullanan araştırmacılar overrun değerinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Bu artışın ise suşlar tarafından üretilen EPS'ye bağlı olduğunu belirten araştırmacılar bu bağlamda EPS üreten suş kullanımının stabiliteye katkı sağlayabileceğini ve oksijen kullanımında verim artışı olabileceğini değerlendirmişlerdir (Kanca & ark., 2023). Bu çalışmada hava artış oranının EPS'ye bağlı olabileceği değerlendirilse de daha kesin sonuçlar için deney ve kontrol gruplarında EPS artışının olup olmadığı ile ilgili ileri analizlerin yapılması gerektiği değerlendirilmektedir.

EPS'nin süt ürünleri üzerindeki uygulamaları incelendiğinde, araştırmaların ağırlıklı olarak yoğurt ve ayran gibi fermente süt ürünlerine odaklandığı görülmektedir. Ancak gerek Türkiye'de gerekse uluslararası literatürde EPS'nin peynirin teknolojik ve duyuşal özelliklerine etkisi üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Mevcut çalışmaların bulguları ise çoğu zaman birbiriyle çelişmektedir. Bu durumun temel nedenlerinden biri, peynirin üretim sürecinin ve özellikle olgunlaşma periyodunun, yoğurt ve ayran gibi ürünlere kıyasla daha uzun ve karmaşık olması olabilir. Ayrıca, elde edilen çelişkili sonuçlar, her bir EPS'nin yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin farklılık göstermesinden kaynaklanmakta olup bu alanda bilimsel bir standardizasyonun oluşturulabilmesi için daha kapsamlı ve sistematik araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç ve Gelecekteki Beklentiler

Ekzopolisakkaritler (EPS), gıdadan farmasötik uygulamalara, ziraatten plastik endüstrisine, tıptan beslenme bilimlerine kadar çok çeşitli alanlarda önemli bir potansiyel arz eden biyopolimerlerdir. EPS'lerin temel yapısının karbon (C) atomu üzerine inşa edilmesi ve karbon atomunun çok sayıda kovalent bağ yapabilme özelliğine sahip olması, geniş bir yapısal çeşitlilik ve dolayısıyla farklı EPS türlerinin sentezlenebilmesine olanak tanımaktadır (Coşkun, 2023). Ayrıca EPS sentezinin; pH, besi ortamının kompozisyonu, sıcaklık, inhibitör veya aktivatör maddelerin varlığı gibi çevresel faktörlere duyarlı olması da bu çeşitliliği artıran önemli unsurlar arasında yer almaktadır (Dikmen & ark., 2023). EPS'ler yalnızca lineer yapıda birer hidrokarbon zinciri olmayıp; çoklu dallanma noktaları içeren, bu dallanmalardan da alt dallar oluşturabilen, temel sakkarit yapılarına ek olarak pirüvat, süksinat, amino asitler ve propiyonat gibi çeşitli fonksiyonel grupları da içerebilen kompleks organik makromoleküllerdir. Bu yapısal çeşitlilik, EPS'lerin kullanım alanlarını genişletirken, üretim

verimliliği ve fonksiyonellik gibi hususları da araştırılması gereken başlıca konular hâline getirmektedir (Halaj & ark., 2022). Endüstriyel ölçekte ekonomik üretimin sağlanabilmesi için EPS veriminin ortalama olarak 10-15 g/L düzeyinde olması gerekmektedir. Her ne kadar pek çok mikroorganizma EPS üretebilse de bu seviyelere ulaşmak oldukça güçtür. Literatürde sunulan bazı çalışmalar, bu üretim seviyesine ulaşan suşların endüstriyel uygulamalar açısından potansiyel taşıdığını; düşük üretim kapasitelerine sahip suşların ise yerinde üretim veya fonksiyonel katkı sağlayıcı ajanlar olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, üretim koşullarındaki (inkübasyon sıcaklığı, ortam bileşimi vb.) değişikliklerin, düşük verimli suşlarda bile EPS üretimini artırabileceği ve bu suşların da potansiyel endüstriyel kaynaklara dönüşebileceği öngörülmektedir. EPS'lerin verimlilik başta olmak üzere uygulama zorlukları da ayrıca ele alınması gereken önemli bir problemdir. Bir EPS'nin ticari olarak verimli şekilde üretilebilmesi tek başına yeterli bir faktör değildir. EPS'lerin monomer kompozisyonları, dallanma biçimleri ve dereceleri ve molekül ağırlıkları oldukça dinamiktir. Bir diğer ifade ile yapısal heterojenite fonksiyonel özelliklerin belirlenmesinde ve standartlaşmada zorluklar meydana getirmektedir. Bu sorun gıda ve ilaç gibi standardizasyonun elzem olduğu ve düzenleme gerektiren alanlar için oldukça kısıtlayıcı etkiler gösterebilir (Zhang & ark., 2024).

Fonksiyonellik, EPS'lerin uygulanabilirliğinde belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Laboratuvar ortamında elde edilen olumlu bulgulara rağmen, özellikle gıda sistemleri gibi canlı sistemlerle etkileşim gerektiren uygulamalarda EPS'lerin davranışlarının net bir şekilde ortaya konması gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar uzun vadeli ve yüksek maliyetli araştırmaları zorunlu kılmaktadır. Fakat EPS'lerin yapılarının oldukça kompleks olması saflaştırmayı ve dolayısıyla net etkisini

görmeyi zorlaştırabilir. Saflaştırma esnasında EPS yapılarının zarar görme olasılığı da bulunduğundan bir EPS'yi olduğu gibi izole edip endüstriyel olarak kullanmak oldukça zordur (Juraskova & ark., 2025; Nguyen & ark., 2024).

EPS'lerin kullanımındaki temel zorluklardan biri de kimyasal yapıların inert olmamalarıdır. Bu biyopolimerler, kimyasal olarak reaktif özellikler sergileyebilmekte; dolayısıyla su, tuz, sıcaklık, pH, asidik-bazik ortam ve mineral madde varlığı gibi çeşitli çevresel faktörlerle etkileşime girebilmektedir. EPS'nin reaktif fonksiyonlarından kaynaklanan bu durum özellikle laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçların canlı ortamında da görülmesini güçleştirmektedir. Başka bir ifadeyle, laboratuvar ölçeğinde gösterilen fonksiyonel etkilerin, canlı organizma içerisindeki kompleks biyokimyasal ortamda aynı şekilde gözlemlenebilmesi oldukça sınırlıdır. Bu durum biyolojik sistemlerde stabil ve etkili bir EPS üretimini ve uygulamasını önemli ölçüde kısıtlamakta; dolayısıyla EPS'lerin terapötik, nutrasötik ya da fonksiyonel gıda bileşeni olarak kullanılabilirliğini azaltmaktadır (Zhang & ark., 2021; Mouro & ark., 2024). Ayrıca, üretilecek EPS'lerin genotoksik veya sitotoksik etkilere sahip olmamaları ve bu nedenle GRAS veya QPS statüsünde olmaları gerekmektedir. Örneğin *Klebsiella*, *Pseudomonas* ve *Enterobacter* gibi bazı bakteri türleri yüksek verimlilikte ve yapı, işlev ve biyoteknolojik olarak değerli olan EPS'ler üretebilir; fakat bu bakteriler fırsatçı patojenler olarak değerlendirilir ve dolayısıyla bunların yerinde üretimde veya ticari suş olarak EPS üretiminde kullanılmaları son derece riskli olabilir. Bu nedenle genelde GRAS veya QPS sınıfında olan LAB'nin kullanılmasının daha güvenli olacağı değerlendirilmektedir. Patojenik bakterilerden izole edilen yüksek verimli ve işlevsel EPS'lerin kullanımı ciddi riskler taşıyabileceğinden, kaynak suşların güvenilirliği büyük önem arz etmektedir (Almutairi & ark., 2021; Netrusov & ark., 2023; Ghanaim & ark., 2025).

Bakteriyel EPS'ler, bitkisel kaynaklı EPS'lere kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. Üretim miktarının kontrol edilebilir olması, çevresel faktörlerden (iklim, toprak koşulları vb.) etkilenmemesi, geniş tarım alanlarına ihtiyaç duyulmaması bu avantajlar arasında sayılabilir. Özetle, EPS'ler farklı sektörlerde değerlendirilebilecek geniş bir potansiyele sahip biyomoleküller olup, bu potansiyelin tam anlamıyla kullanılabilmesi için sistematik ve kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Dong & ark., 2025; Kumari & ark., 2025; Yang & ark., 2025).

Ayrıca, mevcut araştırmalarda birbirine zıt sonuçların elde edilebilmesi, EPS yapılarının ve onları sentezleyen mikroorganizmaların biyoteknolojik özelliklerinin yanı sıra üretim koşullarına duyarlılıklarından kaynaklanmaktadır. Örneğin, yoğurt üretiminde EPS'lerin su tutma kapasitelerine ilişkin literatürde farklı sonuçların raporlanması, EPS'in yapısal farklılıkları ve üretici suşların özelliklerine bağlıdır. Bu durum, her bir suşun ve onun tarafından üretilen EPS'nin kendi üretim koşulları çerçevesinde ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Yine, birlikte değerlendirilen iki suştan birinin ürettiği EPS'nin moleküler kütlelerinin sıcaklıkla değişiklik gösterdiği, diğ erinin ise sabit kaldığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, sıcaklığın her suş üzerinde aynı etkiyi göstermediğini ve her suşun kendine özgü bir şekilde ele alınması gerektiğini göstermektedir (Bulca 2023; İspirli & ark., 2023).

Sinerezis ve kohezyon özelliklerinin incelendiği çalışmalarda ise, genel olarak EPS'lerin bu özelliklere pozitif katkılar sağladığı rapor edilmiştir. EPS'lerin su tutma kapasitesinin artış göstermesi, onların hidrofilik karakterleri ile ilişkilendirilmiştir. Bu bulgular, EPS'lerin özellikle gıda endüstrisinde yapı düzenleyici ajanlar olarak kullanım potansiyellerini desteklemektedir. EPS'lerin süt ürünlerindeki kullanımına ve etkilerine ilişkin hem ulusal hem de uluslararası literatür incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunluğunun yoğurt ürünü üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir.

Buna karşın, özellikle tereyağı ve peynir gibi diğer süt ürünleri üzerine gerçekleştirilen araştırmalar oldukça sınırlıdır. Bu durum, EPS'lerin söz konusu ürünlerdeki teknolojik ve fonksiyonel etkilerinin yeterince anlaşılmasını engellemekte ve bu alanlarda bilimsel bir standardizasyonun oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, EPS'lerin tereyağı ve peynir üretim süreçlerine etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koyabilecek, çok merkezli ve sistematik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Yılmaz, 2014; Zhu & ark., 2019).

EPS'lerin antioksidan, antidiyabetik, antikarsinojen, immünomodülatör gibi etkilerine ilaveten, viskoz arttırıcı, kıvam verici, emülgatör, biyofilm oluşturucu gibi çok fonksiyonlu işlevleri mevcuttur. Bundan dolayı EPS'ler farmasotik işlemlerden gıda üretimine kadar birçok alanda kullanılabilir. Fakat maliyet ve verim sorunları, standardizasyonun oluşmasını engelleyen heteropolimerik yapıları, çevresel koşullardan ve kaynaktan dolayı dinamik kompozisyonları, genotoksik, sitotoksik gibi toksik etkenler ve canlı organizmada reaktif özelliğinden kaynaklı belirsiz sonuçları EPS'lerin kullanımını kısıtlamaktadır. EPS'nin kullanılması için kaynağın güvenilir olması bir diğer ifadeyle GRAS veya QPS standartlarına uyması, verimli olması ve fonksiyonel olması gerekmekte olup bu bağlamda sistematik çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Kaynakça

Adebayo-Tayo, B. C., Ogundele, B. R., Ajani, O. A., and Olaniyi, O. A. (2024). Characterization of Lactic Acid Bacterium Exopolysaccharide, Biological, and Nutritional Evaluation of Probiotic Formulated Fermented Coconut Beverage. *International Journal of Food Science*, 2024(1), 8923217.

<https://doi.org/10.1155/2024/8923217>

Afonso, A., Garcia Matas, R., Germini, A., Merten, C., & Robinson, T. (2016). EFSA's activities on emerging risks in 2015. *EFSA Supporting Publications*, 13(10).

<https://doi.org/10.2903/SP.EFSA.2016.EN-1100>

Akgül, H. İ. (2020). *Tereyağlarından Ekzopolisakkarit (Eps) Üreten Laktik Asit Bakterilerinin İzolasyonu ve Tereyağı Üretiminde Starter Kültür Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi).

Almutairi, M. H., & Helal, M. M. (2021). Exopolysaccharide production from isolated Enterobacter sp. strain ACD2 from the northwest of Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Science*, 33(2), 101318.

Angelin, J., and Kavitha, M. (2020). Exopolysaccharides from probiotic bacteria and their health potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 853–865.

<https://doi.org/10.1016/j.jb10mac.2020.06.190>

Bahramparvar, M., and Mazaheri Tehrani, M. (2011). Application and functions of stabilizers in ice cream. *Food reviews international*, 27(4), 389-407.

<https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563399>

Bai, M., Huang, T., Guo, S., Wang, Y., Wang, J., Kwok, L. Y., Dan, T., Zhang, H., and Bilige, M. (2020). Probiotic Lactobacillus casei

Zhang improved the properties of stirred yogurt. *Food Bioscience*, 37, 100718.

<https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2020.100718>

Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü. (2013). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/06/20130630-4.htm>

Bulca, S., Güvenç, B., Çelebi, M., & Abbak, M. (2023). The effect of microbial transglutaminase and two different starter cultures on goat milk yogurt. *European Food Research and Technology*, 249(8), 2029-2043.

Cao, F., Liang, M., Liu, J., Liu, Y., Renye, J. A., Qi, P. X., and Ren, D. (2021). Characterization of an exopolysaccharide (EPS-3A) produced by *Streptococcus thermophilus* ZJUIDS-2-01 isolated from traditional yak yogurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 192, 1331–1343.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.055>

Chassaing, B., Koren, O., Goodrich, J. K., Poole, A. C., Srinivasan, S., Ley, R. E., & Gewirtz, A. T. (2015). Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome. *Nature*, 519(7541), 92.

<https://doi.org/10.1038/NATURE14232>

Coşkun, N. (2023). Kimya Ders Denetimi. *Milli Eğitim Dergisi*, 52(238), 1447–1474.

<https://doi.org/10.37669/MILLIEGITIM.1128455>

Darılmaz, D. O., and Gumustekin, Y. (2012). Research on some factors influencing acid and exopolysaccharide produced by dairy *Propionibacterium* strains isolated from traditional homemade Turkish cheeses. *Journal of food protection*, 75(5), 918-926. DOI: [10.4315/0362-028X.JFP-11-510](https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-510)

Dertli, E., Toker, O. S., Durak, M. Z., Yilmaz, M. T., Tatlısu, N. B., Sagdic, O., and Cankurt, H. (2016). Development of a fermented ice-cream as influenced by in situ exopolysaccharide production: Rheological, molecular, microstructural and sensory characterization. *Carbohydrate Polymers*, 136, 427-440.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.047>

Dikmen, H., Goktas, H., Demirbas, F., Kayacan, S., Ispirli, H., Arici, M., Turker, M., Sagdic, O., & Dertli, E. (2023). Multilocus sequence typing of *L. bulgaricus* and *S. thermophilus* strains from Turkish traditional yoghurts and characterisation of their techno-functional roles. *Food Science and Biotechnology*, 33(3), 625–635.

<https://doi.org/10.1007/S10068-023-01366-2>

Dong, J., Chi, Z., Lu, S., Xie, X., Gong, P., Li, H., & Liu, W. (2025). Bacterial exopolysaccharides: Characteristics and antioxidant mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, 289.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138849>

Du, R., Yu, L., Yu, N., Ping, W., Song, G., and Ge, J. (2022). Characterization of exopolysaccharide produced by *Levilactobacillus brevis* HDE-9 and evaluation of its potential use in dairy products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217, 303–311.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.057>

Eren, O., & Şakiroğlu, H. (2025). Ekzopolisakkaritlerin Gıda Teknolojisinde Kullanımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(4), 1371-1382.

<https://doi.org/10.21597/jist.1688273>

Eren, O., Yücel, T., & Şakiroğlu, H. (2025). Selülaz Enzimi ve Gıda Teknolojisinde Kullanımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(2), 556-567.

<https://doi.org/10.21597/jist.1579386>

Ergene, E., & Avcı, A. (2016). Mikrobiyel ekzopolisakkaritler. *Sakarya University Journal of Science (SAUJS)/Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2).

Ergin, F. E. (2021). The influence of incubation temperature and starter culture type on physical properties of ayran. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*, 45(1), 102-117

Freitas, F., Alves, V., Torres, C., Cruz, M., ... I. S.-C., and 2011, undefined. (2011). Fucose-containing exopolysaccharide produced by the newly isolated *Enterobacter* strain A47 DSM 23139. *Carbohydrate Polymers*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861710005771>

Ge, Z., Bao, X., Li, Z., Chen, X., Li, W., Rui, X., Wu, J., Zhang, Q., & Dong, M. (2022). In situ exopolysaccharides produced by *Lactobacillus helveticus* MB2-1 and its effect on gel properties of Sayram ketteki yoghurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 208, 314–323.

<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.03.027>

Ghanaim, A. M., Mohamed, H. I., & El-Ansary, A. E. (2025). Production and characterization of exopolysaccharides from *Pseudomonas aeruginosa* AG01 with some medical potential applications. *Microbial Cell Factories*, 24(1), 107.

Halaj, M., Matulová, M., & Capek, P. (2022). Structural features of biologically active extracellular polysaccharide produced by green microalgae *Dictyosphaerium chlorelloides*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 152–161.
<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.05.197>

İnanan, T., Darılmaz, D. Ö., Yeşildal, T. K., Yüksekdağ, Z., & Yavuz, S. (2024). Structural characteristics of Lacticaseibacillus rhamnosus ACS5 exopolysaccharide in association with its antioxidant and antidiabetic activity in vitro. *International Journal of Biological Macromolecules*, 280, 136148.

İspirli, H., and Dertli, E. (2018). Isolation and identification of exopolysaccharide producer lactic acid bacteria from Turkish yogurt. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), e13351.

İspirli, H., Korkmaz, K., Arioglu-Tuncil, S., Bozkurt, F., Sağdıç, O., Tunçil, Y. E., ... & Dertli, E. (2023). Utilisation of an active branching sucrase from Lactobacillus kunkeei AP-37 to produce technofunctional poly-oligosaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 236, 123967.

Juraskova, D., Ribeiro, S. C., & Silva, C. C. G. (2025). Prebiotic and Health-Promoting Benefits of Dextran-Type Exopolysaccharide Produced by Leuconostoc mesenteroides SJC113. *Foods*, 14(15), 2635.

<https://doi.org/10.3390/FOODS14152635>

Kanca, N., Baş, B., Albayrak Delialioğlu, R. ve Gürsoy, A. (2023). Kefirle zenginleştirilmiş fonksiyonel dondurmanın fiziksel özellikleri ve bakteriyel canlılığı. *Ankara Üniversitesi Veteriner Dergisi/Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 70 (3).

Kaur, N., and Dey, P. (2023). Bacterial exopolysaccharides as emerging bioactive macromolecules: from fundamentals to applications. *Research in Microbiology*, 174(4), 104024.

<https://doi.org/10.1016/J.RESMIC.2022.104024>

Khanal, S. N., and Lucey, J. A. (2018). Effect of fermentation temperature on the properties of exopolysaccharides and the acid gelation behavior for milk fermented by Streptococcus thermophilus

strains DGCC7785 and St-143. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3799–3811. <https://doi.org/10.3168/JDS.2017-13203>

Kumari, J., Kumawat, R., Prasanna, R., Jothieswari, D., Debnath, R., Iqbal, A. M. A., Palit, P., Rawat, R., Gopikrishna, K., & Tiwari, O. N. (2025). Microbial exopolysaccharides: Classification, biosynthetic pathway, industrial extraction and commercial production to unveil its bioprospection: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139917>

Mata, J., Béjar, V., Bressollier, P., ... R. T.-J. of A., and 2008, undefined. (2008). Characterization of exopolysaccharides produced by three moderately halophilic bacteria belonging to the family Alteromonadaceae. *Journal of Applied Microbiology* <https://academic.oup.com/jambio/article/abstract/105/2/521/6719308>

Miclotte, L., De Paepe, K., Rymenans, L., Callewaert, C., Raes, J., Rajkovic, A., Van Camp, J., and Van de Wiele, T. (2020). Dietary Emulsifiers Alter Composition and Activity of the Human Gut Microbiota in vitro, Irrespective of Chemical or Natural Emulsifier Origin. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.577474>

Mouro, C., Gomes, A. P., & Gouveia, I. C. (2024). Microbial exopolysaccharides: structure, diversity, applications, and future frontiers in sustainable functional materials. *Polysaccharides*, 5(3), 241-287.

Naimi, S., Viennois, E., Gewirtz, A. T., and Chassaing, B. (2021). Direct impact of commonly used dietary emulsifiers on human gut microbiota. *Microbiome*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/S40168-020-00996-6/FIGURES/8>

Netrusov, A. I., Liyaskina, E. V., Kurgaeva, I. V., Liyaskina, A. U., Yang, G., & Revin, V. V. (2023). Exopolysaccharides producing bacteria: a review. *Microorganisms*, 11(6), 1541.

Nguyen, H. T., Pham, T. T., Nguyen, P. T., Le-Buanec, H., Rabetafika, H. N., & Razafindralambo, H. L. (2024). Advances in Microbial Exopolysaccharides: Present and Future Applications. *Biomolecules* 2024, Vol. 14, Page 1162, 14(9), 1162.

<https://doi.org/10.3390/BIOM14091162>

Nwodo, U. U., Green, E., and Okoh, A. I. (2012). Bacterial Exopolysaccharides: Functionality and Prospects. *International Journal of Molecular Sciences* 2012, Vol. 13, Pages 14002–14015, 13(11), 14002–14015.

<https://doi.org/10.3390/IJMS131114002>

Oluk, C. A., and Güven, M. (2015). Effects of use of exopolysaccharide producing and non producing culture on free fatty acid composition of Tulum cheese.

Özdemir, N. (2023). Gene expression, structural characterization, and functional properties of exopolysaccharide produced from potential probiotic enterococcus faecalis NOC219 strain. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 195(10), 6183–6202. DOI: [10.1007/s12010-023-04393-1](https://doi.org/10.1007/s12010-023-04393-1)

Özer, E. (2024). Characteristics of apricot yogurt fermented with different culture strains and stevia. *Italian Journal of Food Science*, 36(3), 151. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v36i3.2584>

Patel, A. K., Michaud, P., Singhania, R. R., Soccol, C. R., and Pandey, A. (2010). Polysaccharides from Probiotics: New Developments as Food Additives. *Food Technology and Biotechnology*, 48(4), 451–463.

Pourjafar, H., Ansari, F., Sadeghi, A., Samakkhah, S. A., and Jafari, S. M. (2023). Functional and health-promoting properties of probiotics' exopolysaccharides; isolation, characterization, and applications in the food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(26), 8194–8225.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2047883>

Ryan, P. M., Ross, R. P., Fitzgerald, G. F., Caplice, N. M., and Stanton, C. (2015). Sugar-coated: exopolysaccharide producing lactic acid bacteria for food and human health applications. *Food and Function*, 6(3), 679–693. <https://doi.org/10.1039/C4FO00529E>

Sahan, N., Var, I., Yasar, K., and Zorlugenc, B., (2006). The effects of using exopolysaccharide producing cultures on the microbiological, physicochemical and sensory properties of ayran. *Archiv Fur Lebensmittelhygiene*, vol.57, no.4, 118-123.

Sorensen, H. M., Rochfort, K. D., Maye, S., MacLeod, G., Brabazon, D., Loscher, C., and Freeland, B. (2022). Exopolysaccharides of Lactic Acid Bacteria: Production, Purification and Health Benefits towards Functional Food. *Nutrients* 2022, (14), 2938.

<https://doi.org/10.3390/NU14142938>

Soyuçok, A., Ekiz, T., & Başığit Kılıç, G. (2016). Ekzopolisakkaritlerin Özellikleri ve Gıda Sanayindeki Önemi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 332-344.

<https://doi.org/10.17100/nevbiltek.211029>

Şanlı, E., Gürsel, A., Şanlı, T., Yıldız, F., and Benli, M. (2018). Az Yağlı Kaşar Peyniri Üretiminde Ekzopolisakkarit Üreten Kültür Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. *Gıda*, 43(3), 490-500.

Tian, H., Gu, Y., Lv, Z., and Wang, L. (2024). The exopolysaccharides produced by *Leuconostoc mesenteroides* XR1 and its effect on silk drawing phenomenon of yoghurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 262, 129952.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129952>

Tiwari, S., Kavitate, D., Devi, P. B., and Halady Shetty, P. (2021). Bacterial exopolysaccharides for improvement of technological, functional and rheological properties of yoghurt. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1585–1595. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.05.140>

Wang, L., Wu, T., Zhang, Y., Yang, K., He, Y., Deng, K., Liang, C., and Gu, Y. (2023). Comparative studies on the nutritional and physicochemical properties of yoghurts from cows', goats', and camels' milk powder. *International Dairy Journal*, 138, 105542. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105542>

Willumsen, P. A., and Karlson, U. (1996). Screening of bacteria, isolated from PAH-contaminated soils, for production of biosurfactants and bioemulsifiers. *Biodegradation*, 7(5), 415–423. <https://doi.org/10.1007/BF00056425/METRICS>

Xiao, M., Ren, X., Yu, Y., Gao, W., Zhu, C., Sun, H., Kong, Q., Fu, X., and Mou, H. (2022). Fucose-containing bacterial exopolysaccharides: Sources, biological activities, and food applications. *Food Chemistry: X*, 13, 100233. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2022.100233>

Xu, Z., Guo, Q., Zhang, H., Xiong, Z., Zhang, X., and Ai, L. (2021). Structural characterisation of EPS of *Streptococcus thermophilus* S-3 and its application in milk fermentation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 178, 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.173>

Yang, Y., Shi, X., Zhang, J., Xiao, H., & Li, C. (2025). Molecular mechanisms underlying the beneficial effects of fermented yoghurt prepared by nano-exopolysaccharide-producing *Lactiplantibacillus plantarum* LCC-605 based on untargeted metabolomic analysis.

Yao, D., Dong, M., Dai, C., and Wu, S. (2019). Inflammation and Inflammatory Cytokine Contribute to the Initiation and Development of Ulcerative Colitis and Its Associated Cancer. *Inflammatory Bowel Diseases*, 25(10), 1595–1602.
<https://doi.org/10.1093/IBD/IZZ149>

Yaşar, K., and Yeydem, A. (2023). The Effect of Different Culture and Stabilizer Use on the Physicochemical and Sensory Properties of Ice Cream. *Journal of Raw Materials to Processed Foods*, 4(2), 123-132. <https://doi.org/10.57252/jrpfoods.2023.10>

Yılmaz, M. T., Dertli, E., Toker, O. S., Tatlisu, N. B., Sagdic, O., and Arici, M. (2015). Effect of in situ exopolysaccharide production on physicochemical, rheological, sensory, and microstructural properties of the yogurt drink ayran: an optimization study based on fermentation kinetics. *Journal of Dairy Science*, 98(3), 1604-1624.

Yılmaz, M. T., Yetim, H., Arıcı, M., & Sağdıç, O. (2014). Ekzopolisakkarit (EPS) üreten laktik asit bakterilerinin bazı gıdaların tekstürel, reolojik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi. *Program Kodu*, 1001.

Yüksekdağ, Z., Ahlatcı, N. S., Hajikhani, R., Darılmaz, D. O., and Beyatlı, Y. (2021). Safety and metabolic characteristics of 17 *Enterococcus faecium* isolates. *Archives of Microbiology*, 203(9), 5683-5694. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02536-8>

Zhang, K., Tang, H., Farid, M. S., Xiang, F., and Li, B. (2024). Effect of *Lactobacillus helveticus* exopolysaccharides molecular weight on yogurt gel properties and its internal mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, 262, 130006.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130006>

Zhang, X. L., Li, G. X., Ge, Y. M., Iqbal, N. M., Yang, X., Cui, Z. D., & Yang, Q. (2021). *Sphingopyxis microcystis* sp. nov., a novel bioactive exopolysaccharides-bearing Sphingomonadaceae isolated from the Microcystis phycosphere. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 114(6), 845-857.

Zhu, Y., Wang, X., Pan, W., Shen, X., He, Y., Yin, H., Zhou, K., Zou, L., Chen, S., and Liu, S. (2019). Exopolysaccharides produced by yogurt-texture improving *Lactobacillus plantarum* RS20D and the immunoregulatory activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 342–349.

<https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.09.201>

BÖLÜM 2

MİKROBİYAL LİPAZLAR: GIDA ENDÜSTRİSİNE YÖNELİK BİYOKATALİZÖRLER

Eda ÖNDÜL KOÇ¹

Giriş

Lipazlar (E.C. 3.1.1.3), serin hidrolaz grubuna ait lipolitik enzimler olarak kabul edilirler (Salgado & ark., 2022). Lipazlar, çok yönlü ve etkili biyokatalizör olup hidrolitik özellikleri nedeniyle su ve organik moleküller arasındaki ara yüzlerde yüksek aktivite gösterirler. Aynı zamanda karboksilik ester bağlarını parçaladıktan sonra trigliseritlerden digliseritler, monogliseritler, serbest yağ asitleri ve gliserol üretebilirler (Dhavade & ark., 2025). Lipazlar, daha çok 10 karbon atomundan daha uzun zincirli yağ asitleri içeren substratları hidrolize eder. Ayrıca, kısa ve orta zincirli yağ asitlerini içeren substratları da hidrolize edebilmektedirler (Salgado & ark., 2022). Ancak uzun zincirli trigliseritler (LCT'ler), temel olmalarına rağmen yavaş metabolize edilir ve yağ dokusunda birikme eğilimindedir. Uzun zincirli yağ asitleri (LCFA'lar), normal fizyolojik fonksiyonların sürdürülmesi için gerekli olan esansiyel yağ asitlerinin sağlanmasında hayati öneme sahiptir. Buna karşılık,

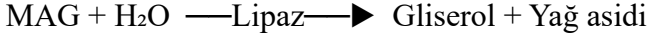
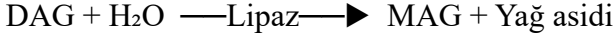
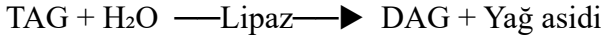
¹ Dr. Öğr. Üyesi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Yeniçağa Yaşar Çelik Meslek Yüksekokulu, ORCID ID: 0000-0002-1659-0813

orta zincirli trigliseritler (MCT'ler) hızla hidrolize olarak orta zincirli yağ asitlerine (MCFA'lara) dönüşür ve bu yağ asitleri karaciğere hızla taşınarak anında enerji üretiminde kullanılır; böylece yağ depolanması en aza indirilir (Han & ark., 2025). Hidroliz reaksiyonuna ek olarak, bu reaksiyonda nükleofilik ajan bir su molekülü iken, lipazlar ters reaksiyon olan esterifikasyonu da katalize edebilmektedir (Borrelli & Trono, 2015). Ester grubunun dönüşümüne bağlı olarak lipazlar tarafından başka reaksiyonlar da katalize edilebilmektedir. Bunlar Şekil 1' de de gösterildiği gibi arasında nükleofil ajan olarak alkollerin rol aldığı ve gliseroliz gibi reaksiyonları kapsayan transesterifikasyon, iki farklı esterin sübstitüentleri arasında değişim ile karakterize edilen interesterifikasyon ile karboksilatların ve aminlerin sırasıyla nükleofilik ajan olarak görev yaptığı asidoliz ve aminoliz yer almaktadır (Salgado & ark., 2022; Wang & ark., 2025). Lipazlar, aktivitelerini ve katalitik yeteneklerini sulu olmayan ortamlarda sürdürmeleri, yüksek üretimleri ve pH aralıklarında kararlılıkları ile karakterize edilir ve yardımcı faktörlere ihtiyaç duymazlar (Reyes-Reyes & ark., 2022). Spesifisitelerine göre lipazlar dört ana gruba ayrılmaktadır: a) enantiyoselektif lipazlar: rasemik bir karışımda enantiyomerleri ayırt edebilir; b) substrat-spesifik lipazlar: farklı bileşenler içeren bir karışımda belirli bir substrata seçici olarak etki ederek istenen ürünün sentezini kolaylaştırır; c) rejyoselektif lipazlar (1,3-rejyospesifik ve 2-rejyospesifik lipazlar olarak ikiye ayrılır) ve d) non-spesifik lipazlar; 1,3-rejyospesifik lipazlar, triasilgliserollerin (TAG) 1 ve 3 pozisyonlarından yağ asitlerini serbest bırakır ve ikincil pozisyonlardaki ester bağlarını hidrolize edemez. 2-rejyospesifik lipazlar, triasilgliserollerin (TAG) ikincil pozisyonunda yer alan yağ asitlerini serbest bırakır ve spesifik olarak 1,3-diasilgliserol oluşumunu sağlar (Chen & ark., 2025; Sengupta & ark., 2025). TAG'lar, çeşitli zincir uzunluklarına (C4-C30) ve doygunluk derecelerine sahip üç yağ asidine bağlanmış bir gliserol omurgasından oluşan nötr lipitlerdir (Zhang & ark., 2025). Non-

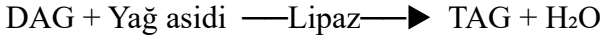
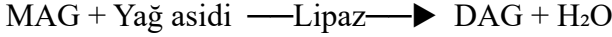
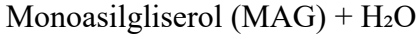
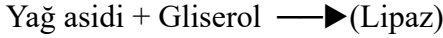
spesifik lipazlar ise TAG'nin hidrolizini yağ asitleri ve gliserole kadar katalize eder; bu süreçte monoasilgliserol (MAG) ve diasilgliserol (DAG) ara ürünleri oluşur ve substrat üzerindeki ester gruplarını herhangi bir pozisyonda hidrolize edebilir (Memarpoor-Yazdi & ark., 2017; Wang & ark., 2025). Yapısal olarak, çoğu lipaz, belirgin bir kapak alanı, kanonik bir α/β -hidrolaz katlanması ve reaksiyon ara ürünlerini stabilize eden bir oksianyon deliği içerir (Sarmah & ark., 2018; Brodzka & ark., 2026). Özellikle, bazı lipazlarda tipik bir kapak bulunmazken (*Candida antarctica* lipaz B gibi), bazıları da çift katmanlı bir kapağa sahiptir (*Bacillus subtilis* lipaz A (BSLA) gibi) (Han & ark., 2025). Lipazların katalitik üçlüsü serin (Ser), histidin (His) ve aspartik asit (Asp) veya glutamik asitten (Glu) oluşur. Hidrofobik substratların varlığında, lipazlar ara yüzlere güçlü bir şekilde adsorbe olur ve bu da çözünmeyen substratlara erişimi kolaylaştırarak enzimatik aktiviteyi artırır; bu olaya ara yüz aktivasyonu denir (Mathesh & ark., 2016; Tacin & ark., 2021). Bu enzimler; kimyasal yöntemlere alternatifler sunarak, orta düzey reaksiyon koşulları altında ve daha düşük enerji tüketimiyle doğal veya sentetik materyallerin sentezi için endüstriyel dönüşümlerde güvenli ve değerli araçlar olarak kullanılmaktadır (Memarpoor-Yazdi & ark., 2017). Lipazlar, katalitik çeşitlilikleri ve substrat özgüllükleri nedeniyle tahıl ve yağ, gıda, günlük kimyasallar, biyodizel, lipid kimyasalları, kağıt üretimi, deterjanlar, ilaçlar ve deri dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ahmed & ark., 2024; Xu & ark., 2025). Lipazların katalize ettiği reaksiyonların çeşitliliği nedeniyle, bu enzimler biyoteknolojik açıdan önemli biyokatalizörler olarak taşıdığı önem göz önüne alındığında, bu derleme; süt ürünleri, yağ ve katı yağlar, fırıncılık ve şekerleme, et ile diğer endüstrilerde mikrobiyal lipazların üretimi ve uygulamalarını vurgulamaktadır.

Şekil 1. Lipazların katalize ettiği reaksiyonlar

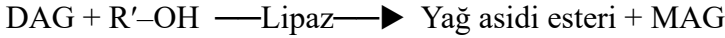
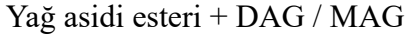
Hidroliz



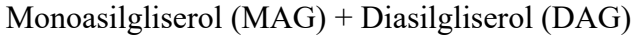
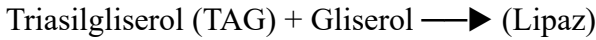
Esterifikasyon



Transesterifikasyon



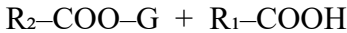
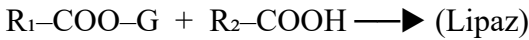
Gliseroliz



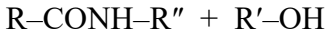
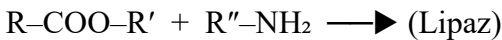
İnteresterifikasyon



Asidoliz



Aminoliz



Mikrobiyal lipazların üretimi

Lipazlar bitkilerde, hayvanlarda ve mikroorganizmalarda yaygın olarak bulunur ve özellikleri bakımından önemli ölçüde farklılık gösterirler (Wang & ark., 2025). Mikrobiyal kökenli lipazlar, katalitik çok yönlülükleri, özgüllükleri, yüksek verimleri, üstün stabiliteleri ve hayvansal ve bitkisel kökenli lipazlara göre daha yüksek bulunabilirlikleri nedeniyle endüstrinin büyük ilgisini çekmiştir (Sarmah & ark., 2018). Endüstriyel mikrobiyal lipazların çoğu mantarlardan elde edilir ve lipaz üreten mantarların başlıca cinsleri arasında *Candida*, *Aspergillus* ve *Rhizopus* bulunur. *Candida* türleri arasında *Candida antarctica* lipazı ve *Candida rugosa* lipazı yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu & ark., 2022). Novozymes® (Bagsværd, Danimarka), DuPont® (Wilmington, DE, ABD), Roche® (Basel, İsviçre) ve Amano (Yokohama, Japonya) lipaz üreten ve ticarileştiren başlıca şirketlerdir (Reyes-Reyes & ark., 2022). Bakteriyel lipazlar da, katalitik çok yönlülükleri, güçlü çevresel uyum yetenekleri ve önemli endüstrileşme potansiyellerine sahip enzimlerdir. Lipaz üretebilen başlıca bakteri cinsleri arasında *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Serratia* ve *Burkholderia* yer almaktadır ve bu lipazlar, aroma esteri sentezi ve biyodizel üretimi gibi endüstriyel katalitik alanlarda geniş uygulama alanları bulmaktadır (Chen & ark., 2025). Endüstriyel uygulamalar için lipazlar, fermentasyon yoluyla büyük ölçekte üretilmektedir. Fermentasyon teknolojisi, mikroorganizmaların karmaşık substratları basit bileşiklere ayırarak metabolize ettiği ve zamanla birçok enzim ve yan ürün ürettiği süreçtir (Salgado & ark., 2022). Lipaz üretim seviyelerinin, üreten mikroorganizmalara ve işlem koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değiştiği unutulmamalıdır. Katı hal fermentasyonu (SSF) ve daldırma fermentasyonu (SMF), enzim üretimi için iyi bilinen iki tekniktir. Endüstriyel enzimlerin hemen hemen %90'ı, bakterilerin normalde SSF'ye kıyasla büyümek için ihtiyaç duyduğu yüksek su aktivitesi (>0,9) nedeniyle SMF ile üretilir. Bu nedenle SMF,

mikrobiyal lipaz üretimi için yaygın olarak kullanılır ve genellikle daha yüksek termostabilite ile sonuçlanır (Sarmah & ark., 2018).

Lipaz immobilizasyonu

Enzim geri kazanımını kolaylaştırmak için enzim immobilizasyonu yapılmalıdır. Bu, ürün kontaminasyonunu önler ve immobilize edilmiş enzimin yeniden kullanılabilecek kadar kararlı olması koşuluyla enzimin yeniden kullanımını destekler. Enzim immobilizasyonu, enzimin geri kazanılabilirliğini, stabilitesini ve aktivitesini artırır ve böylece endüstriyel uygulamalarda lipaz maliyetini düşürebilir (Santos & Fernandez-lafuente, 2017). "İmmobilizasyon" süreci, enzimin orijinal özelliklerinin biyokataliz sırasında korunmasını ve/veya iyileştirilmesini sağlamanın bir yolu olarak görülmüştür ve enzimin belirli bir bölgesinin inert bir desteğe veya çözünmeyen bir matrise bağlanması veya desteğin içinde içsel olarak sınırlandırılması yoluyla gerçekleşir (Tacin & ark., 2021). Enzim immobilizasyonu için en yaygın kullanılan yöntemler; adsorpsiyon, kovalent bağlama, kapsülleme ve çapraz bağlamadır. Adsorpsiyon, enzimi van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları, elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler gibi zayıf kuvvetler yoluyla bir desteğe bağlamak için kullanılan basit ve düşük maliyetli bir tekniktir. Kovalent bağlama yöntemleri ise, genellikle amino asit zincirleri ve fonksiyonel grupları içeren, enzim ve destek arasında güçlü kovalent bağların oluşumuna dayanır. Kapsülleme işlemlerinde, enzim kimyasal olarak reaksiyona girmeden destek matrisinin içine kapatılır. Son olarak, çapraz bağlama işlemleri, enzim molekülleri arasında bağlar oluşturmak için bifonksiyonel bir ajan kullanır ve taşıyıcı içermeyen bir enzim kompleksi elde edilmesini sağlar (Almeida & ark., 2021). Ribeiro & ark. (2025), serbest enzimlerin kararsızlık sorununu gidermek amacıyla lipaz immobilizasyonu için kitosan ve ksantan gum esaslı çift katmanlı nanokapsüllerin geliştirildiğini rapor etmiştir. İmmobilize lipazın, gelişmiş termal ve pH kararlılığı sergilediği; özellikle 50–60 °C

sıcaklık aralığında ve asidik koşullarda katalitik aktivitesinin belirgin şekilde arttığı ve optimum pH değerinin 9'dan 8'e kaydığı belirlenmiştir. Ayrıca geliştirilen sistemin yüksek substrat afinitesi, iyi tekrar kullanılabilirlik ve öngörülebilir birinci dereceden termal deaktivasyon kinetiği göstermesi, bu immobilizasyon yaklaşımının endüstriyel biyokatalitik uygulamalar açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Gıda Endüstrisinde Mikrobiyal Lipaz Uygulamaları

Mikrobiyal lipazlar, gıda proseslerinde yaygın olarak kullanılmakta olup, hem doku, lezzet ve aroma gibi duyu kalitede arzu edilen değişikliklere izin vermekte hem de gıda ürünlerinin besin değerini artırabilmektedir. Aynı zamanda elde edilen mikrobiyal lipazların özellikleri nedeniyle, gıda ürünlerinin işlenmesini iyileştirmek için bunların araştırılmasına yönelik yoğun bir ilgi bulunmaktadır ve bu yüzden piyasa değerleri de sürekli olarak artmaktadır.

Süt ve ürünleri endüstrisi

Süt endüstrisinde lipazlar, krema, tereyağı ve peynir gibi ürünlerin lezzet, doku ve genel kalite özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Chen & ark., 2025). Bu lipazlar süttten, mikrobiyal fermentasyondan veya dış kaynaklardan kaynaklanabilir. Bununla birlikte, aşırı lipaz aktivitesi istenmeyen tatlara ve doku değişikliklerine yol açabilir, süt ürünlerinin raf ömrünü etkileyebilir ve bazı durumlarda acı tat veya alerjenik bileşiklerin oluşumu nedeniyle sağlık riskleri oluşturabilir (Ahmed & ark., 2024). Süt endüstrisinde lipazlar, süt yağının hidrolizinde, peynir aromasının artırılmasında, peynir olgunlaşmasının hızlandırılmasında ve tereyağının lipolizinde kritik rol oynar. Lipazların eklenmesi, keskin ve ekşi bir aromayı artıran kısa zincirli yağ asitlerinin (C4 ve C6) salınmasına yol açarken, orta zincirli yağ asitlerinin (C12 ve C14) salınması ürüne sabunsu bir tat verir (Memarpoor-Yazdi & ark.,

2017). Süt endüstrisinde lipazlar iki gruba ayrılabilir: endojen lipazlar, özellikle lipoprotein lipaz ve mikroorganizmalardan türetilen ekzojen lipazlar. Triasilgliserol hidrolazlar gibi bazı lipazlar, diyet yağ moleküllerini doymamış yağ asitlerine ve gliserole parçalayarak sütün tadını etkileyebilir. Süt ürünleri endüstrisinde lipaz, süt yağlarını parçalayarak peynir aromasını iyileştirmede veya çeşitli peynir türleri üretmede uygulama alanı bulmaktadır. Bunun ötesinde, lipazın çok yönlülüğü bebek maması, içecekler, fırıncılık, biyosensörler ve daha birçok alana uzanmaktadır (Ribeiro & ark., 2025). Laktik asit bakterilerinin metabolizması yoluyla üretilen organik asitler, lipoliz yoluyla açığa çıkan asitler ile, ekşi kremanın kolloidal yapısını stabilize ederek, dokusal özellikleri ve ürün stabilitesini sinerjik olarak artırır (Yu & ark., 2025). Peynir olgunlaşması; pH, sıcaklık, su aktivitesi ve mikroflora gibi birçok faktörün eş zamanlı etkisiyle gerçekleşen karmaşık bir süreçtir. Peynirin duyusal özellikleri ise kimyasal ve mikrobiyolojik parametreler arasındaki dinamik etkileşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar böylece her peynirin kendine özgü bir lezzet profili oluşur (Zheng & ark., 2021). Bu bağlamda, mikrobiyal lipazlar peynir teknolojisinde önemli bir rol oynayarak yağların hidrolizi yoluyla aroma ve lezzet gelişimine katkı sağlar. Olgunlaşma süreci, lezzet oluşumu açısından kritik bir aşama olup, lipoliz ve proteoliz gibi mikrobiyal kökenli metabolik reaksiyonların yanı sıra çevresel faktörler tarafından yönlendirilen biyokimyasal modülasyonları da kapsar (Jooyandeh & ark., 2009). Yağ asidi zincir uzunluğu, peynir tadını belirleyen temel unsurlardan biridir; kısa zincirli doymamış yağ asitleri lezzeti artırırken, uzun zincirli doymamış yağ asitleri hidroliz sonrasında belirgin bir tat katkısı sağlamayabilir (Zheng & ark., 2021).

Yağ endüstrisi

Yağ ve sıvı yağ modifikasyonu, gıda işleme endüstrisinin yeni ekonomik ve yeşil teknolojiler gerektiren ana alanlarından biridir. Kimyasal veya enzimler tarafından katalize edilen interesterifikasyon, gliserol omurgasındaki yağ asitlerinin değişimine veya gliseritler üzerindeki yağ asitlerinin pozisyonunda bir değişikliğe yol açarak, fizikokimyasal ve besleyici özellikleri değiştirilmiş yapılandırılmış lipidler elde edilmesini sağlar (Salgado & ark., 2022). Yağların ve katı yağların lipolitik dönüşümü arasında, esterifikasyon ve interesterifikasyon, pozisyonel ve yağ asidine özgü lipazlar kullanılarak özel yağlar ve kısmi gliseritler gibi katma değerli ürünler elde etmek için kullanılır ve hidroliz yoluyla toplu yağ asidi üretiminden daha büyük endüstriyel potansiyele sahiptir (Aravindan & ark., 2007). Bu özellikleri, lipazları özellikle biyoyakıt üretimi ve gıda endüstrisinde aromatik esterlerin sentezi için kimyasal yöntemlere sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif hâline getirmektedir (Sengupta & ark., 2025). Yüksek maliyetine rağmen, enzimatik interesterifikasyon, kimyasal interesterifikasyona göre daha hafif işleme koşulları, daha az yan ürün ve daha kolay ürün geri kazanımı gibi ek avantajlar sunar (Sivakanthan & Madhujith, 2020). Ayrıca, trans izomer içeriği düşük olan modifiye yağlar ve katı yağlar elde etmek de mümkündür (Salgado & ark., 2022).

Unlu mamuller ve şekerleme endüstrisi

Ekmek üretiminde, hamurun hacmini, dokusunu ve stabilitesini iyileştirmek için emülgatörlerin kullanılması gereklidir. Son yıllarda ortaya çıkan temiz etiket trendi nedeniyle, bazı üreticilerin stratejisinin bir parçası, işleminden sonra denatüre olan ve bu nedenle etikette yer alması gerekmeyen lipazlar kullanan enzimatik yaklaşımı benimsemektir. Lipazlar, TAG'ların hidroliz reaksiyonlarının katalizörleri olarak, emülgatör olarak kabul edilen ve un içinde bulunan amiloz ile inklüzyon kompleksleri

oluşturabilen MAG'ları ve DAG'ları serbest bırakarak ekmeğin özgül hacmini ve sertliğini artırır (Salgado & ark., 2022). Ekmek yapımında, hamuru güçlendirmek, ekmeğin hacmini artırmak, iç yapısını yumuşatmak ve bayatlamayı geciktirmek için emülgatörlerin kullanımı yaygın olarak uygulanmaktadır. Mekanizma, emülgatörlerin amfifilik doğasına dayanmaktadır; bu doğa, nişasta ve gluten proteinleriyle kompleks oluşumunu destekleyerek hamurun dayanıklılığını artırır (Frauenlob & ark., 2018). Bir çalışmada, ekmeğ yapımında fırıncılık emülgatörü DATEM'e (monoglisericitlerin diasetil tartarik esteri) enzimatik bir alternatif olarak ticari lipazların etkinliği, özellikle ekmeğ yüksekliği ve bayatlama davranışı açısından değerlendirilmiştir. Mikrofirınlama deneyleri, hem lipazların hem de DATEM'in kontrol grubuna kıyasla ekmeğ hacmini anlamlı düzeyde artırdığını ve iç kısmın sertleşmesini geciktirdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, test edilen konsantrasyonlarda tüm lipazlar bayatlamayı geciktirici etki gosterse de, ekmeğ yüksekliğinde azalma ve daha sınırlı bayatlama kontrolü nedeniyle hiçbirinin DATEM'in genel performansına ulaşamadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, lipaz bazlı fırıncılık formülasyonlarının etkinliğinin artırılması için daha ileri optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç olduğunu göstermektedir. (Frauenlob & ark., 2018).

Bir çalışmada, kakao yağı eşdeğerleri (CBE), palmiye orta fraksiyonu (PMF) ile stearik asidin lipaz katalizli enzimatik interesterifikasyonu yoluyla sentezlenmiştir. Lipozyme RM IM kullanılarak optimize edilen reaksiyon koşullarında yüksek verim (> %92) elde edilmiş ve üretilen CBE'nin triasilgliserol bileşimi doğal kakao yağına olduğa benzer bulunmuştur. Fiziksel ve termal analizler, CBE'nin polimorfik yapısı ve katı yağ içeriği eğrilerinin kakao yağı ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CBE'nin kakao yağı ile %40'a kadar karıştırılmasının termodinamik özellikler üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığı belirlenmiş ve

kakao yağının CBE ile ikamesinin uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır (Huang & ark., 2021).

Et endüstrisi

Et işleme sırasında, esas olarak enzimler tarafından katalize edilen bir dizi biyokimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyonlar, ölüm sonrası glikoliz, proteoliz ve lipolizden sorumlu enzimleri içerir. Kas lipidlerinin ve yağ dokusunun enzimatik hidroliziyle serbest yağ asitleri üretilir (Abril & ark., 2023). Tüketiciler tarafından duyuşal özellikleri nedeniyle beğenilen fermente et ürünlerinde, kas ve yağ dokularındaki lipid hidrolizi ve oksidasyonu, fermente lezzetin gelişmesine katkıda bulunan önemli süreçlerdir. Fermente et ürünlerinde lipaz aktivitesi, bir başlangıç kültüründen veya yağ hücrelerinin ve kas liflerinin endojen enzimlerinden kaynaklanır (Chen & ark., 2017; Salgado & ark., 2022).

Diğer endüstriler

Tek hücre yağlar (Single Cell Oils, SCO), kuru hücre kütlelerinde %20'den fazla (kütlece) lipid biriktirebilen mikroorganizmalardan elde edilebilen yenilebilir yağlar olarak tanımlanır (Kanno Mathias & ark., 2020; Yücel & Eren, 2023). Bu yağlar, hayvansal veya bitkisel kökenli yağlara ve katı yağlara bileşim olarak benzerdir veya bu tür yağlarda bulunanlardan bile daha yüksek oranlarda uzun zincirli çoklu doymamış yağ asitleri içerebilir. Bakteriler, mikroalgler, mayalar ve filamentli mantarlar dahil olmak üzere bazı özel mikroorganizmalar, tarımsal-endüstriyel atıklardan ve yan ürünlerden SCO üretebilme ve yetiştirebilme yeteneğine sahiptir; bu da bu kalıntıların değerlendirilmesini, çevreye faydaları ve potansiyel olarak yüksek katma değerli lipidlerin üretimini mümkün kılar. Günümüzde SCO'lar, bebek mamalarında araşidonik asit (20:4 n-6, ARA) ve DHA kaynakları olarak hayvansal olmayan kökenli önemli besin takviyeleri

bileşenleridir. Lipit ve nutrasötik endüstrilerinde lipazlar, mikrobiyal yağların üretim sonrası modifikasyonunda çok önemli bir rol oynar. Örneğin, DHA açısından zengin tek hücreli yağlar, orta zincirli yağ asitleriyle lipaz katalizli asidoliz yoluyla enzimatik olarak yapılandırılmış lipitlere dönüştürülebilir ve bu da triaçilgliserol bileşiminin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu tür uygulamalar, immobilize ve rejiospesifik enzimler de dahil olmak üzere lipaz tipinin seçiminin, yağ asidi birleştirme verimliliğinin ve nihai lipit ürünlerinin fonksiyonel performansının temel belirleyicisi olduğunu göstermektedir (Kanno Mathias & ark., 2020).

Süperkritik karbondioksit (sc-CO₂) ortamında lipaz katalizli biyodizel üretimi, çevre dostu bir çözücü kullanımı, yüksek reaksiyon seçiciliği, düşük yan ürün oluşumu ve kolay çözücü geri kazanımı gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım yeşil kimya ve döngüsel biyoekonomi ilkeleriyle uyumludur ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına katkıda bulunur (Badgujar & ark., 2025). Bununla birlikte, yüksek basınç gereksinimleri, artan reaktör ve proses maliyetleri, sc-CO₂ koşulları altında lipaz aktivitesi ve stabilitesindeki potansiyel sınırlamalar ve ölçeklendirmeye ilgili teknik belirsizlikler, endüstriyel uygulama için önemli zorluklar olmaya devam etmektedir. Oladepo & ark., 2025, yenilebilir olmayan mezbaha atık yağlarının, hiperaktif zirkonya ile immobilize edilmiş bir lipaz kullanılarak çözücü içermeyen bir transesterifikasyon işlemi yoluyla biyodizele dönüştürülmesiyle değerlendirilmesini vurgulayarak, atıktan enerjiye dönüşüm için verimli ve sürdürülebilir bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir. Vitamin esterlerinin (özellikle A ve C vitamini türevleri) geleneksel kimyasal yöntemlerle üretiminin; çok basamaklı olması, uzun işlem süreleri gerektirmesi, çevreye atık ve kirlетici bırakması ve kimyasal katalizörlerin bertarafında zorluklar yaratması gibi önemli dezavantajlara sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu sorunlara alternatif olarak, immobilize lipaz (özellikle Novozym 435)

kullanımıyla gerçekleştirilen biyokatalitik yaklaşımların daha sürdürülebilir ve verimli olduğu gösterilmiştir. Lipaz katalizli süreçlerle üretilen retinol esterleri (örneğin retinol laurat), daha kısa reaksiyon süresi ve oksidasyona karşı daha yüksek stabilite sergilemekte olup, gıda takviyeleri ve kozmetik uygulamalar için uygun fonksiyonel katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, bu biyokatalitik süreçlerin yapay sinir ağları (ANN) ve ultrasonik sistemler ile optimize edilmesi, ürün kalitesini ve proses verimliliğini daha da artırmaktadır. Askorbik asit (C vitamini), insan vücudu tarafından sentezlenemeyen ve güçlü antioksidan özellikleri sayesinde oksidatif strese, çevresel kirliliğe ve güneş radyasyonuna karşı koruyucu etki gösteren suda çözünebilen bir vitamindir. Ancak düşük stabilitesi ve kolay bozunabilir yapısı, kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, askorbik asidin stabilitesini ve fizyolojik etkinliğini artırmak amacıyla yağ asitleri ile esterifikasyonu tercih edilmektedir. Lipaz katalizli reaksiyonlar ile gerçekleştirilen bu süreçte, antioksidan kapasite korunarak 6-O-askorbil esterler (örneğin askorbil palmitat ve askorbil oleat) elde edilmekte olup, bu türevler gıda ve kozmetik endüstrilerinde daha stabil ve fonksiyonel katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır (Reyes-Reyes & ark., 2022).

Lipazlar, geranil esterlerin biyosentezinde de yüksek seçicilik ve verim sağlayan çevre dostu biyokatalizörler olup, reaksiyon sıcaklığı, asil donör tipi ve su aktivitesi gibi proses parametrelerinin optimizasyonu ile doğal aroma olarak tanımlanan ürünlerin yüksek dönüşümle elde edilmesine olanak tanır (Liu & ark., 2022).

Bir çalışmada, *Withania somnifera* L. Dunal bitkisinin gövdesinden izole edilen endofitik *Bacillus pumilus* WSS5 suşundan elde edilen lipazın deterjan endüstrisindeki kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Safılaştırılan lipaz, alkali pH ve orta sıcaklık koşullarında yüksek aktivite göstermiş; metal iyonları, yüzey aktif

maddeler ve organik çözücüler varlığında stabilitesini korumuştur. Leke giderme deneyleri, lipaz ilavesinin ticari deterjanların yağ lekelerini uzaklaştırma etkinliğini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymuştur. Alkali ve ısıya dayanıklılığı, organik çözücü toleransı ve geniş substrat özgüllüğü sayesinde bu lipazın deterjan formülasyonları için umut verici bir biyokatalizör olduğu sonucuna varılmıştır (Khan & ark., 2023).

Sonuç

Mikrobiyal lipazlar, özgüllükleri, katalize ettikleri reaksiyonların çok yönlülüğü ve çözücülerin, sıcaklıkların ve pH'ın varlığına bağlı olarak değişen kararlılıkları gibi özellikleri nedeniyle gıda endüstrisinde büyük potansiyele sahiptir ve bu da onları mükemmel biyokatalizörler haline getirir. Katalitik özellikleri sayesinde, her endüstriyel uygulama için uygun bir lipaz bulmak veya hedeflemek mümkündür; bu da tekrarlanabilir, verimli ve istenmeyen yan ürünlerden arındırılmış kataliz koşullarına olanak tanır, çevresel etkileri azaltır ve daha olumlu sonuçlar sağlar.

Kaynakça

Ahmed, F., Ma, Y. B., Niu, X., Bian, X. J., Ding, Y., Zhao, Y., & Malakar, P. K. (2024). Emerging technologies for lipase detection in dairy: A review. *Journal of Food Composition and Analysis* (Vol. 136). Academic Press Inc.

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106802>

Almeida, F. L. C., Castro, M. P. J., Travália, B. M., & Forte, M. B. S. (2021). Trends in lipase immobilization: Bibliometric review and patent analysis. *Process Biochemistry*, 110, 37–51. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2021.07.005>

Aravindan, R., Anbumathi, P., & Viruthagiri, T. (2007). Lipase applications in food industry. *Indian Journal of Biotechnology* (Vol. 6).

Abril, B., Bou, R., García-Pérez, J. V., & Benedito, J. (2023). Role of Enzymatic Reactions in Meat Processing and Use of Emerging Technologies for Process Intensification. *Foods* (Vol. 12, Issue 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods12101940>

Badgujar, K. C., Badgujar, V. C., Deshmukh, D. S., Bhenki, P. V., & Bhanage, B. M. (2025). Sustainable production of biodiesel by lipase catalysis in supercritical carbon dioxide: Revealing key research gaps, process engineering, scale-up, sustainability, circular economy perspective and challenges. *Bioresource Technology* (Vol. 438). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133219>

Brodzka, A., Mazur, A., Koszelewski, D., & Ostaszewski, R. (2026). The modulation of lipase from *Candida rugosa* activity by peptidomimetics. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 132, 118490. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2025.118490>

Chen, Q., Yang, J., Chen, C., Yu, H., & Tian, H. (2025). Microbial lipases in cheese production: an in-depth review of their role in quality, texture, and flavor. *Critical Reviews in Food Science and*

Nutrition. Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2544815>

Dhavade, A., Hinge, S., & Sabharwal, S. (2025). Immobilization of lipase on biodegradable starch-based membrane and its application. *Carbohydrate Research*, 554.
<https://doi.org/10.1016/j.carres.2025.109553>

Frauenlob, J., Scharl, M., D'Amico, S., & Schoenlechner, R. (2018). Effect of different lipases on bread staling in comparison with Diacetyl tartaric ester of monoglycerides (DATEM). *Cereal Chemistry*, 95(3), 367–372. <https://doi.org/10.1002/cche.10047>

Han, Y., Fang, H., Nie, X., Zhang, X., Lu, Z., Nian, B., Hu, Y., & Cheng, W. (2025). Potential applications of lipases rational design in the synthesis of medium- and long-chain triglycerides: Current advances and perspectives. *Food Chemistry* (Vol. 493). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146049>

Huang, Z., Guo, Z., Xie, D., Cao, Z., Chen, L., Wang, H., Jiang, L., & Shen, Q. (2021). Rhizomucor miehei lipase-catalysed synthesis of cocoa butter equivalent from palm mid-fraction and stearic acid: Characteristics and feasibility as cocoa butter alternative. *Food Chemistry*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128407>

Jooyandeh, H., Kaur, A., & Minhas, K. S. (2009). Lipases in dairy industry: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 181–189.

Kanno Mathias, D., Piazzentin Costa, J., Rodrigues Calvo, C., Claro da Silva, R., Converti, A., Segura, N., Jachmanián, I., Gioielli, L. A., & Rodrigues Ract, J. N. (2020). Incorporation of caprylic acid into a single cell oil rich in docosahexaenoic acid for the production of specialty lipids. *Food Technology and Biotechnology*, 58(4), 411–422. <https://doi.org/10.17113/ftb.58.04.20.6546>

- Khan, S. S., Verma, V., & Rasool, S. (2023). Purification and characterization of lipase enzyme from endophytic *Bacillus pumilus* WSS5 for application in detergent industry. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102681>
- Liu, Y. Q., WeiZhuo, X., & Wei, X. (2022). A review on lipase-catalyzed synthesis of geranyl esters as flavor additives for food, pharmaceutical and cosmetic applications. *Food Chemistry Advances* (Vol. 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100052>
- Mathesh, M., Luan, B., Akanbi, T. O., Weber, J. K., Liu, J., Barrow, C. J., Zhou, R., & Yang, W. (2016). Opening Lids: Modulation of Lipase Immobilization by Graphene Oxides. *ACS Catalysis*, 6(7), 4760–4768. <https://doi.org/10.1021/acscatal.6b00942>
- Memarpoor-Yazdi, M., Karbalaee-Heidari, H. R., & Khajeh, K. (2017). Production of the renewable extremophile lipase: Valuable biocatalyst with potential usage in food industry. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.12.015>
- Reyes-Reyes, A. L., Valero Barranco, F., & Sandoval, G. (2022). Recent Advances in Lipases and Their Applications in the Food and Nutraceutical Industry. *Catalysts* (Vol. 12, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/catal12090960>
- Ribeiro, E. S., Machado, B. R., Farias, B. S. de, Han, L. H., Santos, L. O. dos, Duarte, S. H., Cadaval Junior, T. R. S. A., Pinto, L. A. de A., & Diaz, P. S. (2025). Bi-layer nanocapsules based on chitosan and xanthan gum for lipase immobilization. *Journal of Molecular Liquids*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.128031>
- Salgado, C. A., dos Santos, C. I. A., & Vanetti, M. C. D. (2022). Microbial lipases: Propitious biocatalysts for the food industry. *Food*

Bioscience (Vol. 45). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101509>

Santos, C. S., & Fernandez-lafuente, R. (2017). enzyme biocatalysts the design of immobilized enzyme biocatalysts. August.
<https://doi.org/10.1039/c7tb01639e>

Sarmah, N., Revathi, D., Sheelu, G., Yamuna Rani, K., Sridhar, S., Mehtab, V., & Sumana, C. (2018). Recent advances on sources and industrial applications of lipases. *Biotechnology Progress* (Vol. 34, Issue 1, pp. 5–28). John Wiley and Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/btpr.2581>

Sengupta, D., Preisig, H. A., Sarkar, U., & Das, A. (2025). Lipase catalyzed production of valuable esters used as biofuels: A review highlighting specificity, selectivity, inhibitions, mechanisms, scale-up, and optimization of yield by ML and statistical techniques. *Next Research*, 2(2), 100216.
<https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100216>

Sivakanthan, S., & Madhujith, T. (2020). Current trends in applications of enzymatic interesterification of fats and oils: A review. *LWT – Food Science and Technology*, 132, 109880.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109880>

Tacin, M. V., Costa-Silva, T. A., de Paula, A. V., Palomo, J. M., & Santos-Ebinuma, V. de C. (2021). Microbial lipase: a new approach for a heterogeneous biocatalyst. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 51(8), 749–760.
<https://doi.org/10.1080/10826068.2020.1855442>

Wang, G., Abdella, A., Fakhari, M., Dong, J., Yang, K. K., & Yang, S. T. (2025). Recent advances in engineering microbial lipases for industrial applications. *Biotechnology Advances* (Vol. 83). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108658>

- Xu, L., Li, J., Zhang, H., Zhang, M., Qi, C., & Wang, C. (2025). Biological modification and industrial applications of microbial lipases: A general review. *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 302). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140486>
- Yu, P., Guan, C., Yuan, Y., Liu, Y., Wang, X., Yang, R., Zhang, C., Chen, D., Huang, Y., & Gu, R. (2025). Characterization of *Lactococcus lactis* grx602: A novel lipase-producing probiotic strain for nutritional and sensory enhancement of sour cream. *Food Bioscience*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107918>
- Yücel, T., & Eren, O., (2023). Selülaz Enzimi ve Yağ Teknolojisinde Kullanımı. *3rd International Congress on Multidisciplinary Natural Sciences International Congress on Multidisciplinary Natural Sciences* (pp.213-216). Ankara, Turkey
- Zhang, Y. X., Lei, J. Y., Wen, T. T., Qian, Y. F., Meng, C. Z., Sun, L., Sun, W. J., & Cui, F. J. (2025). Selective production of functional sn-1,3-diacylglycerol by microbial lipases: A comprehensive review. *Food Chemistry* (Vol. 481). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144017>
- 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* (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.703284>

BÖLÜM 3

GIDA ENDÜSTRİSİNDE DEZENFEKSİYON YÖNTEMİ OLARAK NANOTEKNOLOJİNİN KULLANIMI

ABDULLAH DEMİRCİ¹

Giriş

Gıda endüstrisi, tüketici sağlığını korumak ve ürün kalitesini sağlamak için etkili dezenfeksiyon yöntemlerine bağımlıdır. Gıda üretim tesislerinde, ekipmanlarda ve yüzeylerde bulunan mikroorganizmalar, gıda kaynaklı hastalıklara, ürün bozulmasına ve ekonomik kayıplara neden olabilir. Geleneksel dezenfeksiyon yöntemleri (örneğin, ısı, klor, ozon, UV ışınımı) yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak bazı sınırlamaları vardır. Bu sınırlamalar arasında, yüksek konsantrasyonlarda kullanıldıklarında toksik olabilmeleri, belirli mikroorganizmalara karşı etkisiz olabilmeleri, kalıntı bırakabilmeleri ve çevreye zarar verebilmeleri sayılabilir. Bu nedenle, gıda endüstrisi daha etkili, güvenli ve çevre dostu dezenfeksiyon yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır.

Nanoteknoloji, son yıllarda gıda mikrobiyolojisi alanında önemli bir ilgi görmüştür ve yeni nesil dezenfeksiyon yöntemleri için umut

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Arı ve Arı Ürünleri Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-0422-5632

verici çözümler sunmaktadır. Nanomateriyaller (nanopartiküller, nanokaplamalar, nanoemülsiyonlar, nanolifler), benzersiz fizikokimyasal özellikleri (yüksek yüzey alanı/hacim oranı, küçük boyut, yüksek reaktivite) sayesinde antimikrobiyal aktivite gösterme potansiyeline sahiptir. Bu özellikler, nanomateriyallerin mikroorganizmalarla daha etkili bir şekilde etkileşime girmesini ve onları inaktive etmesini sağlar (Hamad & ark., 2018). Bu bölümde, nanoteknoloji ile geliştirilmiş yeni nesil dezenfeksiyon yöntemlerinin gıda üretimindeki uygulamaları, avantajları, dezavantajları ve düzenleyici yönleri detaylı olarak incelenecektir.

Gıda Endüstrisindeki Mikrobiyal Riskler ve Geleneksel Dezenfeksiyon Yöntemlerinin Dezavantajları

Gıda endüstrisindeki mikrobiyal riskler, hammaddelerin kontaminasyonu, yetersiz hijyen uygulamaları, uygunsuz işleme ve depolama koşulları gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir (Kayaardı & ark., 2024). *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter*, *Staphylococcus aureus*, *Toxoplasma gondii*, *Clostridium perfringens* ve *Norovirüs* gibi patojen bakteriler, gıda kaynaklı hastalıklara neden olabilirken, küf ve mayalar gıda bozulmasına yol açabilir (Çakıcı & ark., 2015; King & ark., 2018; Naeem & Bourassa 2024; Bozdeveci 2025).

Geleneksel dezenfeksiyon yöntemleri, bu mikrobiyal riskleri azaltmada önemli bir rol oynamaktadır, ancak aşağıdaki dezavantajlara sahiptir:

Isı İşlemi: Gıdaların ve ekipmanların sterilizasyonu için etkili bir yöntemdir, ancak bazı gıdaların besin değerini ve duyuşal özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, enerji yoğun bir yöntemdir.

Klor ve Klor Bileşikleri: Geniş spektrumlu antimikrobiyal aktiviteye sahiptirler, ancak yüksek konsantrasyonlarda toksik

olabilirler ve dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) oluşturabilirler (Güler & Can 2017).

Ozon: Güçlü bir oksitleyici ajandır ve birçok mikroorganizmayı inaktive edebilir, ancak yüksek konsantrasyonlarda toksik olabilir ve ekipmanların korozyonuna neden olabilir.

UV Işınımı: Yüzey dezenfeksiyonu için etkilidir, ancak gölgelenen alanlara nüfuz edemez ve bazı mikroorganizmalar UV ışınımına karşı dirençli olabilir.

Kuaterner Amonyum Bileşikleri (QAC'ler): Yüzey aktif maddelerdir ve antimikrobiyal aktiviteye sahiptirler, ancak bazı mikroorganizmalar QAC'lere karşı direnç geliştirebilir ve kalıntı bırakabilirler (Başkaya & ark., 2009; Dikme 224).

Bu sınırlamalar, gıda endüstrisini daha etkili, güvenli ve çevre dostu dezenfeksiyon yöntemleri aramaya yöneltmiştir.

Nanoteknoloji ile Geliştirilmiş Yeni Nesil Dezenfeksiyon Yöntemleri

Gıda hazırlamada kullanılan bakteri bulaşmış bir yüzeye uygulanan nano-dezenfektanın üç boyutlu gösterimi.



(Pokhrel & ark., 2025).

Nanoteknoloji, gıda endüstrisindeki dezenfeksiyon uygulamalarında devrim yaratma potansiyeline sahip yenilikçi çözümler sunmaktadır. Nanomateriyallerin benzersiz özellikleri, mikroorganizmalarla etkileşimlerini optimize ederek daha etkili ve güvenli dezenfeksiyon yöntemleri geliştirmeyi mümkün kılmaktadır (Var & Sağlam 2015). Yukarıdaki şekilde bir nano sanitizerin etki mekanizması örneği; kırmızı yapılar, çubuk şeklindeki Enterobakterileri (*E. coli*, *Salmonella*) göstermektedir.

Nanopartiküller

Nanopartiküller, 1-100 nm boyut aralığında olan ve antimikrobiyal aktiviteye sahip olabilen malzemelerdir. En çok araştırılan ve kullanılan nanopartiküller şunlardır (Hançer 2025):

Gümüş Nanopartiküller (AgNPs): AgNPs, geniş spektrumlu antimikrobiyal aktiviteye sahiptir ve bakteri, virüs, mantar ve protozoları inaktive edebilir. AgNPs'nin antimikrobiyal mekanizması, hücre duvarına zarar verme, DNA replikasyonunu bozma ve oksidatif stres oluşturma gibi çeşitli yolları içerir. AgNPs, gıda işleme ekipmanlarının, yüzeylerin ve ambalaj malzemelerinin dezenfeksiyonunda kullanılabilir (Suvana & ark., 2022; Ogidi & ark., 2023).

Titanyum Dioksit Nanopartiküller (TiO₂ NPs): TiO₂ NPs, UV ışığı altında fotokatalitik aktivite gösterir ve organik kirleticileri ve mikroorganizmaları parçalayabilir. TiO₂ NPs, gıda işleme tesislerindeki hava ve su dezenfeksiyonunda kullanılabilir (Ogunnupebi & ark., 2020); Tamilselvi & ark., 2025).

Çinko Oksit Nanopartiküller (ZnO NPs): ZnO NPs, AgNPs'ye benzer şekilde antimikrobiyal aktiviteye sahiptir ve daha az toksik olduğu düşünülmektedir. ZnO NPs, gıda ambalaj malzemelerinde ve yüzey dezenfeksiyonunda kullanılabilir (Vijayaraj & ark., 2023; Lopes & ark., 2025).

Bakır Nanopartiküller (CuNPs): CuNPs, güçlü antimikrobiyal aktiviteye sahiptir ve daha ucuz bir alternatif olabilir. Ancak, CuNPs'nin toksisitesi AgNPs'den daha yüksek olabilir (Suvarna & ark., 2022).

Altın ve Alüminyum Nanoparçacıkları (AuNPs, AlNPs): güçlü antimikrobiyal aktiviteye sahiptir ancak maliyetli bir yöntem olabilir (Vijayaraj & ark., 2023; Tamilselvi & ark., 2025).

Nanokaplamalar

Nanokaplamalar, gıda işleme ekipmanlarının, yüzeylerin veya gıdaların üzerine ambalaj (akıllı, yenilebilir, biyobozunur) olarak uygulanan ince film tabakalarıdır ve antimikrobiyal özellikler kazandırabilir (Kocaman & Sarımehtetoğlu 2010; Şen & Güner 2023). Nanokaplamalar, nanopartiküllerin, polimerlerin veya diğer malzemelerin kombinasyonundan oluşabilir (Demirci 2024).

Antimikrobiyal Polimer Nanokaplamalar: Kitosan, polilaktik asit (PLA) ve polivinil alkol (PVA) gibi polimerler, antimikrobiyal nanopartiküllerle (örneğin, AgNPs, ZnO NPs) birleştirilerek antimikrobiyal nanokaplamalar oluşturulabilir.

Kendinden Temizleme Özellikli Nanokaplamalar: TiO₂ NPs veya silika nanopartiküller kullanılarak hidrofilik ve fotokatalitik özelliklere sahip nanokaplamalar oluşturulabilir. Bu kaplamalar, yüzeylerin kirlenmesini önler ve kolayca temizlenmesini sağlar.

Nanoemülsiyonlar

Nanoemülsiyonlar, su ve yağ fazlarının bir yüzey aktif madde (surfaktan) yardımıyla kararlı bir şekilde dağılmasıyla oluşan koloidal sistemlerdir. Nanoemülsiyonlar, antimikrobiyal ajanların (örneğin, esansiyel yağlar, organik asitler) etkinliğini artırabilir ve gıda yüzeylerine daha iyi nüfuz etmelerini sağlayabilir (Aswathanarayan & Vittal 2019).

Esansiyel Yağ Nanoemülsiyonları: Kekik yağı, karanfil yağı, tarçın yağı gibi esansiyel yağlar, güçlü antimikrobiyal aktiviteye sahiptirler. Nanoemülsiyon formülasyonları, esansiyel yağların stabilitesini artırır, suda çözünürlüğünü iyileştirir ve gıda yüzeylerinde daha etkili bir şekilde dağılmasını sağlar.

Nanolifler

Nanolifler, elektrospindleme veya diğer yöntemlerle üretilen ve yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olan ince liflerdir. Nanolifler, antimikrobiyal ajanların taşınması ve gıda ambalaj malzemelerinde kullanılmak üzere tasarlanabilir.

Antimikrobiyal Polimer Nanolifler: Kitosan, PVA veya polikaprolakton (PCL) gibi polimerler, antimikrobiyal nanopartiküllerle (örneğin, AgNPs, ZnO NPs) birleştirilerek antimikrobiyal nanolifler oluşturulabilir. Bu nanolifler, gıda ambalaj malzemelerinde kullanılarak gıdaların raf ömrünü uzatabilir (Saka & Gülel 2015; Lin & ark., 2022).

Nanoteknoloji ile Geliştirilmiş Dezenfeksiyon Yöntemlerinin Antimikrobiyal Mekanizmaları

Nanomateriyallerin antimikrobiyal mekanizmaları karmaşıktır ve nanomateriyalin türüne, boyutuna, şekline, yüzey yüküne ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Genel olarak, nanomateriyaller aşağıdaki mekanizmalarla mikroorganizmaları inaktive edebilir:

Hücre Duvarına Zarar Verme: Nanopartiküller, bakteri hücre duvarına bağlanarak veya nüfuz ederek hücre bütünlüğünü bozabilir ve hücre içeriğinin sızmasına neden olabilir (Adeyeye & Ashaolu 2021; Pokhrel & ark., 2022).

DNA Hasarı: Nanopartiküller, bakteri DNA'sına bağlanarak veya DNA replikasyonunu engelleyerek genetik materyali hasar verebilir (Vaze & ark., 219).

Oksidatif Stres: Nanopartiküller, reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek oksidatif stresi tetikleyebilir ve hücrenin oksidatif hasar görmesine neden olabilir.

Protein Disfonksiyonu: Nanopartiküller, bakteri proteinlerine bağlanarak veya proteinlerin yapısını bozarak proteinlerin fonksiyonlarını engelleyebilir.

Metal İyonlarının Salınımı: Bazı nanopartiküller (örneğin, AgNPs, CuNPs), antimikrobiyal aktiviteye sahip olan metal iyonları salgılayabilir.

Nanoteknoloji ile Geliştirilmiş Dezenfeksiyon Yöntemlerinin Gıda Üretimindeki Uygulamaları

Nanoteknoloji ile geliştirilmiş dezenfeksiyon yöntemleri, gıda üretiminin çeşitli aşamalarında kullanılabilir (King & ark., 2018; Deshmukh & ark., 2019; Pal & ark., 2019; Huang & ark., 2021).

Hammadde Dezenfeksiyonu: Meyve, sebze, et ve deniz ürünleri gibi hammaddelerin yüzeyindeki mikroorganizmaların azaltılması için nanoemülsiyonlar veya nanopartikül solüsyonları kullanılabilir.

Ekipman Dezenfeksiyonu: Gıda işleme ekipmanlarının (kesme makineleri, karıştırıcılar, dolum makineleri, konveyör bantları) yüzeylerindeki mikroorganizmaların temizlenmesi ve dezenfekte edilmesi için nanokaplamalar veya nanopartikül bazlı temizlik maddeleri kullanılabilir.

Yüzey Dezenfeksiyonu: Gıda üretim tesislerindeki zemin, duvar ve tavan gibi yüzeylerin dezenfekte edilmesi için nanoemülsiyonlar veya nanokaplamalar kullanılabilir.

Su Dezenfeksiyonu: Gıda üretiminde kullanılan suyun (örneğin, yıkama suyu, soğutma suyu) dezenfekte edilmesi için nanopartiküller (örneğin, TiO₂ NPs) veya nanolifler kullanılabilir.

Ambalaj Malzemesi Dezenfeksiyonu: Gıda ambalaj malzemelerinin (film, kaplar, tepsiler) yüzeyindeki mikroorganizmaların azaltılması için antimikrobiyal nanolifler veya nanokaplamalar kullanılabilir.

Hava Dezenfeksiyonu: Gıda üretim tesislerindeki havanın dezenfekte edilmesi için TiO₂ NPs veya diğer nanopartiküller kullanılabilir.

Güvenlik, Toksisite ve Düzenleyici Hususlar

Nanomateriyallerin gıda endüstrisindeki uygulamaları, güvenlik ve toksisite endişelerini de beraberinde getirmektedir. Nanomateriyallerin potansiyel toksik etkileri, boyutlarına, şekillerine, yüzey özelliklerine, kimyasal bileşimlerine ve konsantrasyonlarına bağlı olarak değişebilir. Nanomateriyallerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır (Karahalil, 2012):

Maruz Kalma Yolları: Nanomateriyallere maruz kalma, gıda yoluyla tüketim, solunum veya cilt teması yoluyla olabilir.

Biyoyararlanım ve Dağılım: Nanomateriyallerin vücuda girdikten sonra ne kadarının emildiği, hangi organlara dağıldığı ve ne kadar süreyle kaldığı önemlidir.

Toksikolojik Etkiler: Nanomateriyallerin hücreler, dokular ve organlar üzerindeki etkileri (örneğin, iltihaplanma, oksidatif stres, DNA hasarı, genotoksisite, immünotoksisite) değerlendirilmelidir.

Gıda endüstrisinde kullanılan nanomateriyallerin güvenliğini sağlamak için sıkı düzenlemeler ve standartlar gereklidir. Dünya genelinde, gıda ile temasta bulunan malzemelerle ilgili düzenlemeler (örneğin, Avrupa Birliği'nde EC No 1935/2004, ABD'de FDA düzenlemeleri) nanomateriyallerin kullanımını da kapsamaktadır. Bu düzenlemeler, nanomateriyallerin gıdaya göçünü sınırlamayı, toksisite testlerini zorunlu kılmayı ve nanomateriyallerin

etiketlenmesini sağlamayı amaçlamaktadır (Adeyeye & ark., 2019; Lawal & ark., 2024; Lallawmkimi & ark., 2025; Kuchipudi & ark., 2025).

Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Nanoteknoloji, gıda üretiminde yeni nesil dezenfeksiyon yöntemleri için umut verici bir potansiyele sahiptir. Nanomateriyaller, geleneksel dezenfeksiyon yöntemlerine kıyasla daha etkili, güvenli ve çevre dostu çözümler sunabilir. Ancak, nanomateriyallerin güvenliği ve toksisitesi ile ilgili endişeler devam etmektedir. Bu nedenle, gıda endüstrisinde nanomateriyallerin kullanımının yaygınlaşması için daha fazla araştırma yapılması, sıkı düzenlemeler oluşturulması ve tüketici güveninin sağlanması gerekmektedir.

Gelecekte, nanoteknoloji ile geliştirilmiş dezenfeksiyon yöntemlerinin daha da gelişmesi ve yaygınlaşması beklenmektedir. Özellikle, akıllı nanomalzemeler (örneğin, uyarıcıya duyarlı nanokaplamalar), kendi kendini iyileştiren nanokaplamalar ve biyobozunur nanomalzemeler gibi alanlarda önemli ilerlemeler kaydedilmesi beklenmektedir. Ayrıca, nanobiosensörlerin ve diğer nanoteknolojik araçların, gıda üretim süreçlerinde hijyen ve güvenliğin izlenmesi için daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir.

Nanoteknolojinin gıda endüstrisindeki potansiyel faydalarını en üst düzeye çıkarmak ve riskleri en aza indirmek için, bilim insanları, endüstri temsilcileri ve düzenleyici kurumlar arasında işbirliği yapılması ve sürdürülebilir, güvenli ve etkili nanoteknolojik çözümler gelir.

Kaynakça

Adeyeye, S. A. O. (2019). Food packaging and nanotechnology: safeguarding consumer health and safety. *Nutrition & Food Science*, 49(6), 1164-1179.

Adeyeye, S. A. O., & Ashaolu, T. J. (2021). Applications of nanomaterials in food packaging: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 44(7), e13708.

Aswathanarayan, J. B., & Vittal, R. R. (2019). Nanoemulsions and their potential applications in food industry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 95.

Başkaya, R., Karagöz, A., & Keskin, Y. (2009). Gıda Sanayinde Temizlik ve Dezenfeksiyon. *TAF Preventive Medicine Bulletin*, 8(1).

Bozdeveci, A. (2025). Gıdaya Mikrobiyal Bulaşma Kaynakları.

Çakıcı, N., Demirel-Zorba, N. N., & Akçalı, A. (2015). Gıda endüstrisi çalışanları ve stafilocokal gıda zehirlenmeleri. *Turkish Bulletin of Hygiene & Experimental Biology/Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji*, 72(4).

Demirci, A. (2024). Arı Ürünlerinin Nanoteknoloji Ve Nanobiyoteknoloji Alanlarında Kullanım Olanakları. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 7(2), 151-156.

Deshmukh, S. P., Patil, S. M., Mullani, S. B., & Delekar, S. D. (2019). Silver nanoparticles as an effective disinfectant: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 97, 954-965.

Dikme, T. G. (2024). Gıda Teknolojisinde Hijyen Ve Sanitasyon. *Sağlık & Bilim 2023: Yeni Nesil Teknolojiler*, 43.

Güler, Ü. A., & Can, Ö. P. (2017). Kimyasal Kontaminantların Çevre Sağlığı ve Gıdalar Üzerine Etkileri. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 170-195.

Hamad, A.F., Han, J.H., Kim, B.C., Rather, I.A. (2018). The intertwine of nanotechnology with the food industry. *Saudi Journal of Biological Sciences* 25 (1), 27-30.

Hançer, A. (2025). 2002-2024 Yılları Arasında Gıda ve Nanoteknoloji Üzerine Yapılan Çalışmaların Bibliyometrik Analizi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(1), 191-205.

Huang, R., Vaze, N., Soorneedi, A., Moore, M. D., Luo, Y., Poverenov, E., ... & Demokritou, P. (2021). A novel antimicrobial technology to enhance food safety and quality of leafy vegetables using engineered water nanostructures. *Environmental Science: Nano*, 8(2), 514-526.

Karahalil, B. (2012). Gıda endüstrisinde nanoteknolojinin kullanılması ve güvenlik sorunu. *Gıda*, 38(1).

Kayaardı, S., Uyarcan, M., & Turan, H. (2024). Gıda Endüstrisinde Bakteriyel Biyofilm Oluşumu, Kontrolü ve Giderilmesine Yönelik Yeni Uygulamalar. *Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 17(Özel Sayı (1)), 63-69.

King, T., Osmond-McLeod, M. J., & Duffy, L. L. (2018). Nanotechnology in the food sector and potential applications for the poultry industry. *Trends in food science & technology*, 72, 62-73.

Kocaman, N., & Sarımeahmetoğlu, B. (2010). The Use of Intelligent Packaging in Foods. *Journal of Turkish Veterinary Medical Society*, 81(2), 67-72.

Kuchipudi, J. D., Selma, F., Mumtaz, M. A., Syamand, H., Hussein, M. K., & Mercado, G. M. Application Of Nanotechnology In Food

Safety And Agriculture: Smart Packaging And Delivery Systems For Enhanced Food Security.

Lallawmkimi, M., Patil, S., Upadhyay, D., Majumdar, N., Kumar, G. S., & Panigrahi, C. K. (2025). Application of nanotechnology in agriculture: opportunities and challenges in the context of environmental sustainability. *Archives of Current Research International*, 25(1), 37-53.

Lawal, M., Payne, J., Onyeaka, H., Alao, A. M., & Okoampah, E. (2024). Boosting food safety in Ghana: Exploring the future of nanotechnology. *Nano Select*, 5(2), 2300078.

Lin, L., Luo, C., Li, C., Chen, X., & Cui, H. (2022). A novel biocompatible ternary nanoparticle with high antibacterial activity: Synthesis, characterization, and its application in beef preservation. *Foods*, 11(3), 438.

Lopes, A. T., Medeiros, M. N., Mota, I. C. C., Almeida, E. L. S., Rodrigues, A. P., Carneiro, G., & Pelissari, F. M. (2025). Development and Characterization of Lipid Micro-and Nanoparticles for the Encapsulation of Pomegranate Seed Oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 127(4), e70008.

Naeem, M., & Bourassa, D. (2024). Optimizing Poultry Nutrition to Combat Salmonella: Insights from the Literature. *Microorganisms*, 12(12), 2612.

Ogidi, C. O., Emmanuel, O. P., Daramola, O. O., Bamigboye, O., & Malomo, O. (2023). Synthesis of silver nanoparticles using cellulose and starch extracted from brewer spent grain: assessment of their antimicrobial and preservatives activities. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(2), 227-238.

Ogunnupebi, T. A., Oluyori, A. P., Dada, A. O., Oladeji, O. S., Inyinbor, A. A., & Egharevba, G. O. (2020). Promising natural products in crop protection and food preservation: Basis, advances, and future prospects. *International Journal of Agronomy*, 2020(1), 8840046.

Pal, G., Rai, P., & Pandey, A. (2019). Green synthesis of nanoparticles: A greener approach for a cleaner future. In *Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles* (pp. 1-26). Elsevier.

Pokhrel, L. R., Jacobs, Z. L., Dikin, D., & Akula, S. M. (2022). Five nanometer size highly positive silver nanoparticles are bactericidal targeting cell wall and adherent fimbriae expression. *Scientific reports*, 12(1), 6729.

Pokhrel, L. R., Knowles, C. A., & Akula, P. T. (2025). Food Safety Promotion via Nanotechnology: An Argumentative Review on Nano-Sanitizers. *Applied Nano*, 6(4), 21.

Saka, E., & Gülel, G. T. (2015). Gıda endüstrisinde nanoteknoloji uygulamaları. *Etlik Veteriner Mikrobiyoloji Dergisi*, 26(2), 52-57.

Suvarna, V., Nair, A., Mallya, R., Khan, T., & Omri, A. (2022). Antimicrobial nanomaterials for food packaging. *Antibiotics*, 11(6), 729.

Şen, K., & Güner, K. G. (2023). Nanoteknolojinin Yenilebilir Filmlere Uygulanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 411-425.

Tamilselvi, Y., Muruganandham, M., Sivasubramanian, K., Vijayalakshmi, D. P., Amirthalingam, T., Reddy, D. S., ... & Velmurugan, P. (2025). Green synthesis of nanoparticles in cocos nucifera pollen extract using aluminium nitrate nanohydrate with

biomedical application and food preservative container. *Discover Nano*, 20(1), 121.

Var, İ., & Sağlam, S. (2015). Gıda Endüstrisinde Nanoteknoloji Uygulamaları. *Gıda*, 40(2), 101-108.

Vijayaraj, R., Altaff, K., Jayaprakashvel, M., Muthezhilan, R., Saran, B., Kurinjinathan, P., ... & Govindan, L. (2023, November). Chitin-Derived Silver Nanoparticles for Enhanced Food Preservation: Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Potential. In *Micro* (Vol. 3, No. 4, pp. 912-929). MDPI.

BÖLÜM 4

GIDA GÜVENLİĞİ ALANINDA ELEKTROSPİNNİNG UYGULAMALARI

Fidan Özge TIKILOĞLU ¹

Giriş

Elektrospinning, gıda ürünlerini bozulma ve kontaminasyondan korumak için gıda teknolojisinde güçlü bir teknik olarak ortaya çıkmaktadır (Ricaurte & Quintanilla-Carvajal, 2019). Yüksek yüzey-kütle oranı ve gözenekli yapısıyla karakterize edilen elektrospun nanolifler, gıda ambalajlama ve muhafaza dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda benzersiz avantajlar sunmaktadır (Ullah & ark., 2023). Yöntemin çok yönlülüğü, maliyet etkinliği ve malzeme seçimindeki kolaylığı, gelişmiş gıda koruma sistemleri oluşturmak için özellikle cazip kılmaktadır (Falcó & Mallavia, 2020). Bu karakteristik özellikler, elektrik alanındaki ayarlamalar yoluyla nanolif çapları kolayca kontrol edilebilen elektrospun filmlerin oluşturulmasını sağlar (Vaz & ark., 2017). Bu teknoloji aynı zamanda çeşitli aktif bileşiklerin dahil edilmesini kolaylaştırarak, çözünme ve biyo-yararlanımı iyileştirerek gıda

¹ Ar. Gör. Dr., Ordu Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü,
Orcid: 0000-0003-4654-601X

muhafazasını artırır (Ghorani & Tucker, 2015; Hemmati & ark., 2021).

Elektrospinning'in hem hidrofilik hem de hidrofobik maddeleri enkapsüle etme kapasitesi, gıda uygulamalarında kontrollü salım için üstün bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Hemmati & ark., 2021). Basitliği ve yüksek fizibilitesi, yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır (Bhushani & Anandharamakrishnan, 2014; Zhang & ark., 2023). Bu durum elektrospinning'i gıda kalitesini ve güvenliğini iyileştirmek için bir yöntem olarak konumlandırmaktadır (Zhang & ark., 2020). Ayrıca, nanolif bileşimini ve yapısını özel ihtiyaçlara göre uyarlama yeteneği, hedeflenen gıda koruma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanır. Bu nanolifler, yüksek gözeneklilikleri nedeniyle polimerik iskeleler olarak özellikle kullanışlıdır (Zhang & ark., 2023).

Son çalışmalar, elektrospun nanoliflerin ilaç dağıtımı, doku mühendisliği ve yara iyileşmesi gibi biyomedikal uygulamalarda kullanımını vurgulamaktadır. Biyomedikal uygulamaların ötesinde, elektrospun nanoliflerin yüksek yüzey alanı-hacim oranı ve ayarlanabilir gözeneklilik gibi benzersiz özellikleri, aktif gıda ambalajlama sistemlerinde ve gıda kaynaklı patojenleri tespit etmek için biyosensörler olarak kullanım potansiyelleri açısından giderek daha fazla araştırılmaktadır (Zhang & ark., 2023). Elektrospinning, gıda korumasında çok yönlü uygulamaları keşfetmeyi amaçlamakta, özellikle antimikrobiyal ambalajlama, aktif gıda muhafazası ve gelişmiş algılama teknolojilerindeki rolüne odaklanmaktadır (Zhang & ark., 2020). Elektrospun nanoliflerin aşırı uzunlukları, yüksek yüzey alanları ve ayarlanabilir gözeneklilikleri gibi ilgi çekici özellikleri, çeşitli endüstriyel uygulamalardaki önemli potansiyellerine katkıda bulunmaktadır (Matthew & ark., 2025).

Bu bölüm, elektrospinning'in temel prensiplerini, yaygın olarak kullanılan malzemeleri ve bu nanofiber yapıların gelişmiş gıda

güvenliğine ve uzatılmış raf ömrüne nasıl katkıda bulunduğunu açıklayacaktır. Bu açık avantajlara rağmen, elektrospon nanolif ürünlerinin hava filtrelemesi dışındaki ticarileşmesi, elektrospinning teknolojisinin mevcut durumu ve gıda koruma alanındaki umut vadeden gelecek yönleri göz önüne alındığında sınırlı kalmaktadır. Mevcut sınırlamaların üstesinden gelmek ve endüstriyel uygulanabilirliğini genişletmek için yapılan yenilikçi adımlar vurgulanmaktadır. Bu bölüm, bu uygulamaları daha ayrıntılı olarak açıklarken, yaygın olarak benimsenmelerini sınırlayan zorlukları da ele alacaktır. Yüksek özgül yüzey alanı, yüksek gözeneklilik ve maliyet etkinliği gibi üstün özellikleri, nanolifleri çeşitli algılama platformlarına entegrasyon için uygun hale getirir. Bu özellikler, antimikrobiyal ajanlar veya antioksidanlar gibi aktif bileşiklerin doğrudan lifli matrise dahil edilmesini kolaylaştırarak, gıda sistemlerinde sürekli salım ve gelişmiş koruyucu etkiler sağlar (Hemmati & ark., 2021).

Elektrospinning Uygulaması

Elektrospinning, çeşitli polimerik çözeltilerden veya eriyiklerden sürekli ultra ince lifler, yani nanolifler üretmek için kullanılan çok yönlü ve maliyet etkin bir tekniktir (Falcó & Mallavia, 2020). Bu yöntem, elektrostatik kuvvetleri kullanarak bir polimer çözeltisini tipik olarak nanometrelerden mikrometrelere kadar değişen çaplarda ince liflere çeker (Vaz & ark., 2017). Temel mekanizma, bir polimer çözeltisine yüksek voltaj uygulanmasını içerir, bu da elektriksel olarak yüklü bir jetin oluşumuna yol açar ve jet uzar ve kurur, çözücü buharlaştıkça sürekli nanolifler oluşturur (Frenot & Chronakis, 2003).

Temel Kurulum ve Mekanizma:

Tipik bir elektrospinning kurulumu nispeten basittir ve genellikle dört temel bileşenden oluşur (Vaz & ark., 2017):

1. **Şırınga Pompası:** Bu, polimer çözeltisinin hassas ve sabit besleme hızını kontrol eder.
2. **İğne (Spinneret/Nozul):** Polimer çözeltisi, genellikle metal bir iğne olan bu noktadan dışarı itilir.
3. **Yüksek Voltaj Güç Kaynağı:** Bu, iğne ve toplayıcı arasında güçlü bir elektrik alanı oluşturur.
4. **Toplayıcı:** Nanoliflerin biriktiği, plaka veya tambur gibi topraklanmış iletken bir yüzeydir.

İğnedeki polimer çözeltisine yüksek voltaj uygulandığında, elektrik alanı nedeniyle sıvı damlacığı konik bir şekle, yani Taylor konisine dönüşür (Garg & Bowlin, 2011; Vaz & ark., 2017). Elektrostatik kuvvetler polimer çözeltisinin yüzey gerilimini aştığında, Taylor konisinin tepesinden ince bir yüklü sıvı jeti dışarı atılır (Leach & ark., 2011; Theron & ark., 2004). Bu jet, jet içindeki benzer yükler arasındaki itici kuvvetler ve dış elektrik alanının çekme kuvveti tarafından yönlendirilen bir süreçle, topraklanmış toplayıcıya doğru ilerlerken önemli ölçüde gerilir ve inceler (Theron & ark., 2004). Jet uzadıkça ve ilerledikçe, çözücü hızla buharlaşır ve toplayıcı üzerinde biriken katı nanolifler bırakır, tipik olarak dokumasız lifli bir mat oluşturur (Vaz & ark., 2017).

Lif Morfolojisini Etkileyen Parametreler:

Elektrospun nanoliflerin son özellikleri, çapları, morfolojileri ve genel kalitesi, çeşitli parametrelerin karmaşık etkileşimi tarafından önemli ölçüde etkilenir (Mhetre & ark., 2023). Bunlar genel olarak çözelti özellikleri, proses parametreleri ve çevresel faktörler olarak kategorize edilebilir:

1. Çözelti Özellikleri:

Polimer Konsantrasyonu: Polimer konsantrasyonunu artırmak genellikle daha büyük lif çaplarına ve boncuk oluşumunda azalmaya yol açar, çünkü daha yüksek viskozite ve zincir dolaşımı gerilmeye karşı daha fazla direnç sağlar (Lewńska & ark., 2018).

Viskozite: Jetin stabilitesini ve ortaya çıkan lif çapını doğrudan etkiler (Szewczyk & Stachewicz, 2020). Düşük viskozite, yetersiz zincir dolaşımı nedeniyle sürekli lif oluşumunu engelleyerek jetin damlacıklara (boncuklara) ayrılmasına neden olabilir (Abdel-hakim & ark., 2023; Subeshan & ark., 2024). Tersine, çok yüksek viskozite ise jetin püskürtülmesini zorlaştırabilir ve iğne ucunun tıkanmasına yol açabilir (Mehta & ark., 2021; Subeshan & ark., 2024), ancak optimum aralıkta artan viskozite genellikle daha büyük ve daha düzgün lif çapları elde edilmesini sağlar (Rafe & ark., 2023; Subeshan & ark., 2024).

Yüzey Gerilimi: Taylor konisinin stabilitesini ve jetin homojenliğini etkiler (Leach & ark., 2011; Vaz & ark., 2017). Yüksek yüzey gerilimi, polimer çözeltisinin jet haline gelmesini zorlaştırabilir ve lif oluşumu sırasında boncuklanmaya yol açabilir, çünkü elektrostatik kuvvetlerin yüzey gerilimini tamamen aşması güçleşir (Mehta & ark., 2021; Selatile & ark., 2018). Öte yandan, çok düşük yüzey gerilimi ise jetin stabilitesini bozarak erken parçalanmasına ve lif yerine damlacık oluşumuna neden olabilir (Yusro & Hacker, 2024).

İletkenlik: Çözeltinin elektriksel iletkenliği, jet üzerindeki yük yoğunluğunu ve dolayısıyla gerilme kuvvetlerini ve lif çapını etkiler (Fatimah & ark., 2020).

2. Proses Parametreleri:

Voltaj: Daha yüksek uygulanan voltajlar tipik olarak polimer jetinin daha fazla gerilmesine neden olarak daha ince liflerin üretimine yol açar (Sorkhabi & ark., 2022).

Akış Hızı: Polimer çözeltisinin beslenme hızı, eğirme için mevcut malzeme miktarını etkiler. Gerilme kuvvetleri orantılı olarak artırılmazsa, daha yüksek akış hızları daha kalın liflere yol açabilir (Theron & ark., 2004).

Spinneret-Toplayıcı Mesafesi: Bu mesafe, birikmeden önce yeterli çözücü buharlaşmasına izin verir ve lif homojenliğini ve çapını etkiler (Vaz & ark., 2017).

3. Çevresel Parametreler:

Sıcaklık ve Nem: Elektrosponning süreci sırasındaki bu ortam koşulları, çözücü buharlaşma hızını önemli ölçüde etkileyebilir ve ardından lif morfolojisini ve homojenliğini etkileyebilir, bu da tek düze ürün kalitesi için dikkatli kontrol gerektirir (Szewczyk & Stachewicz, 2020).

Bu parametrelerin hassas ayarı, aktif gıda ambalajlama, filtreleme ve biyosensör uygulamalarındaki etkinlikleri için kritik olan istenen gözenekliliğe, mekanik dayanıma ve yüzey alanına sahip nanolif matrisleri tasarlamak için çok önemlidir (Vaz & ark., 2017).

Gıda Güvenliğinde Elektrospon Nanoliflerinin Özgün Nitelikleri

Elektrospon nanoliflerin ayırt edici yapısal ve işlevsel özellikleri, gıda güvenliğini sağlamak için son derece avantajlıdır ve geleneksel ambalajlamanın ötesinde aktif ve akıllı gıda sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanır (C. Zhang & ark., 2020; M. Zhang & ark., 2023).

1-Yüksek Yüzey Alanı-Hacim Oranı: Elektrospon nanolifler, hacimlerine göre olağanüstü yüksek bir yüzey alanına sahiptir (Zhang & ark., 2023). Bu özellik, gıda korumasındaki etkinlikleri için temeldir:

- **Gelişmiş Yükleme Kapasitesi:** Geniş yüzey alanı, antimikrobiyal ajanlar, antioksidanlar veya algılama elemanları gibi daha fazla miktarda aktif bileşiğin verimli bir şekilde dahil edilmesini sağlar (Zelča & ark., 2023).
- **Artan Reaktivite ve Algılama Yeteneği:** Mevcut geniş yüzey, hedef moleküllerle etkileşim için daha fazla alan sağlar, bu da antimikrobiyal etkilerin etkinliğini en üst düzeye çıkarmak ve biyosensörlerin hassasiyetini artırmak için çok önemlidir (Matthew & ark., 2025). Bu, çok çeşitli gıda kaynaklı patojenleri ve bozulma göstergelerini tanımlayabilen oldukça seçici biyosensörlerin oluşturulmasını sağlar (Matthew & ark., 2025).

2- Gözenekli Yapı: Elektrospinning ile oluşan dokumasız lifli mat, doğal olarak yüksek derecede gözeneklilik sergiler (Zhang & ark., 2023). Bu karakteristik önemli ölçüde bariyer özelliklerine ve kontrollü salınımına katkıda bulunur:

- **Bariyer Özellikleri:** Gözenekli yapılarına rağmen, karmaşık nanolif ağı, gıda bozulmasında birincil faktörler olan oksijen ve nem gibi gazlara karşı etkili bir bariyer görevi görebilir, böylece gıda kalitesini korur ve raf ömrünü uzatır (Zhang & ark., 2023).
- **Kontrollü Salım:** Gözenekli yapı, kapsüllenmiş aktif bileşiklerin salım hızını kontrol etmek için hassas bir şekilde tasarlanabilir (Hemmati & ark., 2021). Bu, aktif ajanların hızlı tükenmesini önleyen ve gıda ürününün raf ömrü boyunca etkinliklerini sürdüren sürekli ve uzun süreli bir koruyucu etki sağlar (Ghorani & Tucker, 2015).

3-Ayarlanabilir Özellikler: Elektrospinning sürecinin çok yönlülüğü, nanoliflerin özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlayarak, belirli gıda koruma zorlukları için özel çözümlerin geliştirilmesine olanak tanır (Zhang & ark., 2023).

- **Malzeme Seçimi:** Biyolojik uyumlu ve biyolojik olarak parçalanabilir seçenekler dahil olmak üzere geniş bir polimer yelpazesi kullanılabilir, doğrudan gıda teması uygulamaları için güvenliği sağlar (Zhao & ark., 2020).
- **Yapısal Tasarım:** Elektrospinning kurulumunda ve parametrelerinde yapılan değişiklikler, her biri belirli işlevlere sahip çeşitli lif yapılarının oluşturulmasını sağlar (Zhang & ark., 2023).
- **İşlevselleştirme:** Nanolifler, antimikrobiyal aktivite, antioksidan özellikler, pH duyarlılığı veya gelişmiş algılama yetenekleri kazandırmak için çeşitli biyoaktif bileşiklerin dahil edilmesiyle etkili bir şekilde işlevselleştirilebilir (C. Zhang & ark., 2020; M. Zhang & ark., 2023).

Malzemeler ve Bileşenler

Gelişmiş gıda koruması için elektrospun nanoliflerin etkinliği, uygun malzemelerin dikkatli seçimi ve kombinasyonuna kritik olarak bağlıdır (Zhao & ark., 2020). Bu malzemeler genel olarak polimerik matrisler ve içlerine dahil edilen aktif bileşenler olarak kategorize edilebilir (Rwahwire & ark., 2020).

Polimerik Malzemeler

Gıda uygulamaları için nanolifler oluşturmak üzere elektrospinning'de hem sentetik hem de doğal geniş bir polimer yelpazesi kullanılır. Polimer seçimi, biyolojik olarak parçalanabilirlik, biyo-uyumluluk, mekanik dayanım, bariyer özellikleri ve eğrilebilirlik gibi istenen özelliklere göre belirlenir (Zhao & ark., 2020).

1-Sentetik Polimerler: Poli(ϵ -kaprolakton) ve poli(laktik asit) gibi sentetik polimerler, biyolojik olarak parçalanabilirlikleri ve biyolojik sistemlerle doğrudan teması içeren uygulamalar için uygunlukları nedeniyle elektrospinning için yaygın olarak kullanılır.

Polivinil alkol ve poliakrilonitril de kullanılır; örneğin, PVA nanolifleri, nisin yüklü nanoparçacıkları antibakteriyel etkiler için kapsüllemek için kullanılmıştır (Ullah & ark., 2023).

2-Doğal Polimerler ve Biyopolimerler: Yenilenebilirlikleri, biyo-uyumlulukları ve biyolojik olarak parçalanabilirlikleri nedeniyle proteinler ve polisakkaritler gibi doğal polimerlerin ve biyopolimerlerin kullanımına artan bir ilgi vardır (Tahir & ark., 2023).

- **Proteinler:** Jelatin, zein ve peynir altı suyu protein izolatu, elektrospinningte kullanılabilen protein örnekleridir. Örneğin, jelatin bazlı elektrospun nanolifler, jelatinin doğal biyo-uyumluluğunu korurken hidrofobiklik, antibakteriyel aktivite ve antioksidan kapasite gibi gelişmiş özellikler sergileyerek işlevsel gıda ambalajlaması için aday olurlar (Wang & ark., 2019).
- **Polisakkaritler:** Kitosan, selüloz türevleri ve nişasta, elektrospinning'de kullanılan yaygın polisakkaritlerdir (Lin & ark., 2023). Bu biyopolimerler, biyo-uyumlu, biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ve istenen özellikleri elde etmek için modifiye edilebilmeleri nedeniyle aktif gıda bileşenlerini kapsüllemek için umut vadeden taşıyıcılardır (Lin & ark., 2023). Örneğin, elektrospun kitosan/poli(etilen oksit) karışım çözeltileri üretilmiş ve antimikrobiyal aktiviteleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, elektrospinning yoluyla kitosan/PEO/laurik asit arjinat kompozit nanolifli filmler geliştirilmiş, çalışmalar gelişmiş antimikrobiyal aktivitelerini göstermiştir (Li & ark., 2020). Biyopolimerlerin kullanımı, gıda güvenliği ve çevre koruması konusunda artan kamu bilinciyle uyumlu olup, sürdürülebilir gıda ambalaj malzemelerine olan talebi artırmaktadır (Lim, 2020). Bu biyopolimerlerin üretilen lifler

başka türlü elde edilmesi zor olan makro/nanolifli mimarileri üretmek için uygun maliyetli ve kullanıcı dostu bir teknik olarak görülmektedir (Ricaurte & Quintanilla-Carvajal, 2019).

Genel olarak, biyolojik sistemlerle doğrudan veya dolaylı teması içeren uygulamalar, gıda ambalajı dahil olmak üzere, toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilir ve biyo-uyumlu hem doğal hem de sentetik polimerlerden yapılan elektrospun nanolifler için uygundur (Zhao & ark., 2020).

Aktif Bileşenler

Elektrospun nanoliflerin koruyucu yeteneklerini artırmak için polimerik matrise çeşitli aktif bileşenler dahil edilir. Bu bileşenler antimikrobiyal, antioksidan veya akıllı algılama işlevsellikleri sağlayabilir (C. Zhang & ark., 2020; M. Zhang & ark., 2023).

- **Antimikrobiyal Ajanlar:** Antimikrobiyal ajanların eklenmesi, mikrobiyal gelişimi önlemek ve gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için çok önemlidir (Hemmati & ark., 2021; Topuz & Uyar, 2019). Doğal antimikrobiyaller, elektrospinning ile üretilen nanolifler içinde hapsedilebilir, bu da birincil hızlı salınımlarını engeller ve bunların gıda sistemine kontrollü salınımını sağlar (Hemmati & ark., 2021). Elektrospun liflerin yüksek özgül yüzey alanı ve gözenekliliği, antibakteriyel ajanın ortamla etkili bir şekilde temas etmesine ve antimikrobiyal bir rol oynamasına olanak tanır (Amorim & ark., 2022).
- **Antioksidanlar:** Antioksidanlar, gıdalardaki oksidatif bozulmayla mücadele etmek için nanoliflere entegre edilir (Topuz & Uyar, 2019). Elektrospinning, çözünürlüklerini veya biyo-yararlanımlarını artırabilen veya onları dış faktörlerden koruyabilen antioksidanları enkapsüle etmek için mükemmel bir platform sağlar. Yüksek yüzey alanlı

malzemelerin üretimi nedeniyle antioksidan aktivitenin de artmasını sağlayabilir (Munteanu & Vasile, 2021).

- **Akıllı Göstergeler ve Biyosensör Elemanları:** Aktif korumanın ötesinde, elektrospun nanolifler, gıda kalitesi ve güvenliğinin gerçek zamanlı izlenmesi için akıllı göstergeler veya biyosensör elemanları ile işlevselleştirilebilir (Zhang & ark., 2023). Elektrospun nanolifler, bozulabilir gıdaları izlemek için kritik olan pH değişikliklerini görsel olarak tahmin edebilen kolorimetrik pH göstergeleri geliştirmek için başarıyla kullanılmıştır (Tavassoli & ark., 2022). Ayrıca, gıda izlenebilirliği, kalitesi, güvenliği ve besin değerini izlemek için sensörler ve biyosensörler geliştirmede de kilit rol oynamaktadırlar (Matthew & ark., 2025). Elektrospun nanolif tabanlı elektrokimyasal ve optik algılama platformları, mikroorganizmalar ve kimyasal kalıntılar dahil olmak üzere çeşitli bileşikleri tespit etmek için kullanılır (Guerraf & ark., 2022). Akıllı ambalajlama sistemleri, gıdalardaki analitleri hızlı ve doğru biçimde ölçmek için genellikle sensörler ve göstergelerle desteklenir (Zhang & ark., 2023).

Üretim, Karakterizasyon ve Performans Değerlendirmesi

Üretim Yöntemleri ve Optimizasyonu

Gelişmiş gıda korumasına yönelik elektrospun nanoliflerin üretimi, dikkatle kontrol edilen yöntemler ve optimize edilmiş işlem parametrelerine bağlıdır. Çok yönlü ve maliyet açısından verimli bir teknik olan elektrospinning, polimerler, seramikler ve karbon bazlı malzemeler dâhil geniş bir malzeme yelpazesinden ultra ince liflerin elde edilmesini sağlar. (Nayak & Padhye, 2017). Süreç; bir polimer çözeltisine yüksek voltaj uygulanmasıyla elektriksel olarak yüklü bir jetin oluşmasını ve çözücünün buharlaşması ya da soğuması sonucunda bu jetin sürekli nanoliflere dönüşüp kurumasını içerir. Bu

yöntem, nanolif çaplarının hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar; çaplar genellikle nanometre ile birkaç mikrometre arasında değişir ve üç boyutlu lifli yapıların oluşturulmasına olanak tanır. (Nayak & Padhye, 2017).

Gelişmiş Teknikler: İğnesiz Elektrospinning

Endüstriyel ölçekli ultra ince lif üretimi için iğnesiz elektrospinning teknikleri, geleneksel iğne tabanlı yöntemlere kıyasla verimi önemli ölçüde artıran etkili bir strateji olarak ortaya çıkmıştır. Hava filtrelemesi gibi sektörler dışında yaygın ticarileşmede hala zorluklarla karşılaşsa da, iğnesiz elektrospinning, gıda koruma uygulamaları için nanolif üretimini ölçeklendirme konusunda büyük umut vaat etmektedir (Amorim & ark., 2024)

Elektrospun Malzemelerin Karakterizasyonu

Üretimden sonra, elektrospun malzemelerin başarılı oluşumlarını doğrulamak ve gıda koruması için fonksiyonel özelliklerini değerlendirmek amacıyla kapsamlı karakterizasyonları esastır.

- **Morfolojik ve Yapısal Analiz:** Tarama Elektron Mikroskopisi gibi teknikler, elektrospun nanoliflerin morfolojisini, çapını ve homojenliğini gözlemlemek için rutin olarak kullanılmaktadır (Wortmann & ark., 2020). Bu, lif üretiminin tutarlılığı ve herhangi bir kusurun varlığı hakkında kritik bilgiler sağlar (Nugraheni & ark., 2016).
- **Kimyasal ve Mekanik Özellikler:** Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, nanoliflerin kimyasal bileşimini ve aktif ajanların başarılı bir şekilde dahil edilmesini doğrulamak için kullanılır (Nugraheni & ark., 2016). Çekme dayanımı gibi mekanik testler, özellikle fiziksel sağlamlığın gerekli olduğu ambalajlama uygulamaları için malzemenin bütünlüğünü ve dayanıklılığını değerlendirmek için hayati öneme sahiptir (Aqil & ark., 2015; Verschatse & ark., 2023).

Bu titiz karakterizasyon, belirli gıda koruma zorlukları için geliştirilen nanolifli sistemlerin tekrarlanabilirliğini ve etkinliğini sağlar (Jalalah & ark., 2022).

Performans Doğrulama

Elektrospun nanoliflerin gıda korumasındaki etkinliği, aktif ambalajlamadaki ve biyosensörler olarak performansları aracılığıyla gösterilmiştir.

- **Aktif Ambalajlamada Kanıtlanmış Etkinlik:** Elektrospun nanolifler, yüksek yüzey alanı-hacim oranı ve gözenekli yapısı nedeniyle aktif gıda ambalajlamada önemli avantajlar sunar (C. Zhang & ark., 2020; M. Zhang & ark., 2023). Üstün bariyer malzemeleri olarak işlev görebilirler, gaz alışverişini ve nem göçünü etkili bir şekilde engelleyebilirler; bu da gıda tazeliğini korumak ve bozulmayı önlemek için kritik öneme sahiptir (Zhang & ark., 2023). Ayrıca, antimikrobiyal ajanların doğrudan nanolif matrisine veya yüzey kaplamaları olarak dahil edilmesi, gıda bozulmasında etkili bir şekilde analitlerin kesin ölçümünü sağlar (Munteanu & Vasile, 2021; Topuz & Uyar, 2019; Ullah & ark., 2023).
- **Biyosensörlerde Kanıtlanmış Etkinlik:** Bu biyosensörler, gıda kaynaklı patojenleri tespit etmek için hassasiyet, özgüllük, hız, doğruluk ve basitlik açısından avantajlara sahiptir (Awlqadr & ark., 2024). Elektrospun nanoliflerin benzersiz yapısal özellikleri, mikrobiyal toksinler veya kimyasal kalıntılar gibi hedef analitlerin çok küçük konsantrasyonlarını tespit etme yeteneğini önemli ölçüde artırarak (Mercante & ark., 2017), sağlam ve güvenilir algılama platformlarına yol açar (Halicka & Cabaj, 2021). Elektrospun nanoliflerin biyosensör mimarilerine

entegrasyonu, biyomolekül immobilizasyonu ve verimli kütle transferi için yüksek bir yüzey alanı sağlayarak analitik performanslarını önemli ölçüde artırır. Bu da gıda güvenliği uygulamalarında iyileştirilmiş tespit limitleri ve daha hızlı yanıt süreleri sağlar (Mercante & ark., 2017).

Sonuç

Elektrospun nanolifler, yüksek yüzey alanı, artırılmış gözeneklilik ve tek boyutlu sınırlama gibi benzersiz özellikleri sayesinde, gıda güvenliği, kalite kontrolü ve atık azaltma konularında önemli çözümler sunan ileri bir teknolojiyi temsil etmektedir (Lim, 2020; Amorim et al., 2024). Bu nanolifler, gelişmiş bariyer performansları ile gıdaların nem ve oksijene karşı korunmasını sağlayarak mikroorganizma çoğalmasını engeller ve raf ömrünü uzatır; çapraz bağlama gibi modifikasyonlarla termal stabilite ve bariyer özellikleri daha da artırılabilir (Topuz & Uyar, 2019; Zhang et al., 2023). Ayrıca, antioksidan, antibakteriyel ve antifungal özellikler sunarak gıdaların bozulmasını önleyen aktif paketleme çözümleri sağlar ve biyokütle kaynaklı sürdürülebilir polimerlerin kullanımı ile çevresel etkiler azaltılabilir (Hemmati & ark., 2021; Munteanu & Vasile, 2021). Gelişmiş algılama yetenekleri sayesinde, elektrospun nanolifler akıllı ambalaj sistemlerinde de kullanılabilir; sensör ve indikatörlerle gıda kalitesi gerçek zamanlı olarak izlenebilir, uçucu bileşenler ve patojenler hassas şekilde tespit edilerek güvenlik artırılabilir (Chen & ark., 2019; Mohammadi et al., 2020; Amorim et al., 2024). Sonuç olarak, elektrospun nanolifler, gıda korumasını iyileştirirken gıda israfını azaltan yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler sunmakta ve küresel gıda sistemlerinin sürdürülebilirliğine anlamlı katkılarda bulunmaktadır.

Kaynakça

- Abdel-Hakim, A., Elmotasem, H., & Youssef, M. (2023). Optimization of electrospinning parameters for fabrication of uniform polymer nanofibers: Effect of solution viscosity and chain entanglement on bead formation. *Polymer Testing*, 124, 108132. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108132>
- Amorim, L. F. A., Mouro, C., Riool, M., ve ark. (2022). *Antimicrobial food packaging based on prodigiosin-incorporated double-layered bacterial cellulose and chitosan composites*.
- Amorim, L. F., Mouro, C., & Gouveia, I. C. (2024). Electrospun fiber materials based on polysaccharides and natural colorants for food packaging applications. *Cellulose*, 31(10), 6043-6069.
- Aqil, A., Tchemtchoua, V. T., Colige, A., ve ark. (2015). Preparation and characterizations of EGDE crosslinked chitosan electrospun membranes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 34–42.
- Awlqadr, F. H., Altemimi, A. B., Qadir, S. A., ve ark. (2024). Emerging trends in nano-sensors: A new frontier in food safety and quality assurance. *Biosensors and Bioelectronics*, 244, 115798.
- Bhushani, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food-based applications. *Trends in Food Science & Technology*, 38(1), 21–33.
- C. Zhang, Y., Li, P., Wang, M., Wei, X., Xia, H., & Xu, H. (2020). Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100585.
- Chen, Y., Zhao, S., & Wang, X. (2019). Electrospun nanofibers for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 95, 139–150.

El Guerraf, A., Jadi, S. B., Ziani, I., ve ark. (2022). Multifunctional smart conducting polymers–silver nanocomposites-modified biocellulose fibers for innovative food packaging applications. *Nanomaterials*, 12(20), 3594.

Falcó, A., & Mallavia, R. (2020). Electrospun nanomaterials: Applications in food, environmental remediation, and bioengineering. *Nanomaterials*, 10(3), 413.

Fatimah, I., Sari, T. I., & Anggoro, D. (2020). Effect of concentration and nozzle–collector distance on the morphology of nanofibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 858(1), 012009.

Frenot, A., & Chronakis, I. S. (2003). Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 8(1), 101–108.

Garg, K., & Bowlin, G. L. (2011). *Electrospinning: A tool for the fabrication of polymer nanofibers. Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 39(4), 333–363.

Ghorani, B., & Tucker, N. (2015). *Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology*. In *Functional Food Nanotechnology* (pp. 51–68). Springer.

Halicka, K., & Cabaj, J. (2021). *Electrospun nanofibers in sensing. Materials Today Communications*, 29, 102932.²

Hemmati, F., Bahrami, A., Esfanjani, A. F., Salavati-Niasari, M., & Kazemi, M. (2021). Electrospun antimicrobial materials: Advanced packaging materials for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 583–596.

Jalalah, M., Sivasubramaniam, S. S., Aljafari, B., Irfan, M., Almasabi, S. S., Alsuwian, T., ... & Harraz, F. A. (2022). Biowaste assisted preparation of self-nitrogen-doped nanoflakes carbon framework for highly efficient solid-state supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, 54, 105210.

Leach, M. K., Feng, Z.-Q., Tuck, S. J., & Corey, J. M. (2011). Electrospinning fundamentals: Optimizing solution and apparatus parameters. *Journal of Visualized Experiments*(47), e2494. <https://doi.org/10.3791/2494>.

Lewińska, D., et al. (2018). Effect of electrospinning process variables on the size of polymer fibers and bead-on-string structures established with a 2³ factorial design. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9, 2466–2478. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.231>

Li, C., Mu, J., Song, Y., Chen, S., & Xu, F. (2023). Highly aligned cellulose/polypyrrole composite nanofibers via electrospinning and in situ polymerization for anisotropic flexible strain sensor. *ACS applied materials & interfaces*, 15(7), 9820-9829.

Lim, J., Choi, S., & Kim, H. S. (2023). Behavior of melt electrospinning/blowing for polypropylene fiber fabrication. *Polymer International*, 72(1), 120-125.

Lin, B., Chen, G. D., He, F. A., Li, Y., Yang, Y., Shi, B., ... & Lam, K. H. (2023). Preparation of MWCNTs/PVDF composites with high-content β form crystalline of PVDF and enhanced dielectric constant by electrospinning-hot pressing method. *Diamond and Related Materials*, 131, 109556.

Mathew, M., Paroly, S. & Athiyanathil, S. (2025). Biopolymer-based electrospun nanofiber membranes for smart food packaging applications: a review. *RSC Advances*, 15, 21742–21779. <https://doi.org/10.1039/D5RA02348C>

Mehta, P., Rasekh, M., Patel, M., ve ark. (2021). *Recent applications of electrical, centrifugal, and pressurised emerging technologies for fibrous structure engineering in drug delivery, regenerative medicine and theranostics*.

Mercante, L. A., Scagion, V. P., Migliorini, F. L., Mattoso, L. H., & Correa, D. S. (2017). Electrospinning-based (bio) sensors for food and agricultural applications: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 91, 91-103.

Mhetre, H., Kanse, Y., & Chendake, Y. (2023). Influence of electrospinning voltage on the diameter and properties of 1-dimensional zinc oxide nanofiber. *ES Materials & Manufacturing*, 20, Article 838. <https://doi.org/10.30919/esmm5f838>.

Munteanu, B. S., & Vasile, C. (2021). Encapsulation of natural bioactive compounds by electrospinning—Applications in food storage and safety. *Polymers*, 13(21), 3771.

Nayak, R., & Padhye, R. (2017). Nano fibres by electro spinning: Properties and applications. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2(5). <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.02.00074>

Nugraheni, A. D., Purnawati, D., M, B. A. P., Chotimah, Kusumaatmaja, A., & Triyana, K. (2016). Study of thermal degradation of PVA/Chitosan/Gelatin electrospun nanofibers. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1755, No. 1, p. 150017). AIP Publishing LLC.

Rafe, M. H., Shahzad, K., Josien, L., ve ark. (2023). *Structure–property behavior of nanofibers based on polyacrylonitrile/mesoporous silica composites prepared by electrospinning*.

Ricaurte, L. Y. P., & Quintanilla-Carvajal, M. X. (2019). Use of electrospinning technique to produce nanofibres for food industries: a perspective from regulations to characterisations. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.006>

Rwahwire, S., Namuga, C., & Ildephonse, N. (2020). Application of electrospun materials in packaging industry. *Electrospun Materials and Their Allied Applications*, 131-149.

Selatile, M. K., Ray, S. S., Ojijo, V., ve ark. (2018). *Recent developments in polymeric electrospun nanofibrous membranes for seawater desalination*.

Sorkhabi, T. S., Samberan, M. F., Ostrowski, K. A., Zajdel, P., Stempkowska, A., & Gawenda, T. (2022). Electrospinning of poly (acrylamide), poly (acrylic acid) and poly (vinyl alcohol) nanofibers: Characterization and optimization study on the effect of different parameters on mean diameter using taguchi design of experiment method. *Materials*, 15(17), 5876.

Subeshan, B., Atayo, A., & Asmatulu, E. (2024). *Machine learning applications for electrospun nanofibers: A review*.

Szewczyk, P. K., & Stachewicz, U. (2020). The impact of relative humidity on electrospun polymer fibers: From structural changes to fiber morphology. *Advances in Colloid and Interface Science*, 286, 102315. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102315>

Tahir, M., Vicini, S., & Sionkowska, A. (2023). Electrospun materials based on polymer and biopolymer blends—a review. *Polymers*, 15(7), 1654.

Tavassoli-Kafrani, E., Gamage, M. V., Dumée, L. F., Kong, L., & Zhao, S. (2022). Edible films and coatings for shelf life extension of

mango: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(9), 2432-2459.

Theron, S.A., Zussman, E. & Yarin, A.L. (2004). Experimental Investigation of the Governing Parameters in the Electrospinning of Polymer Solutions. *Polymer*, 45(9), 2017-2030.

Topuz, F., & Uyar, T. (2019). Electrospinning of nanocomposite nanofibers from cyclodextrin and laponite. *Composites Communications*, 12, 33-38.

Vaz, B. da S., Costa, J. A. V., & Moraes, M. G. de. (2017). Production of polymeric nanofibers with different conditions of the electrospinning process. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(2). <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0180>

Verschafte, O., Loccufer, E., Swankaert, B., De Clerck, K., & Daelemans, L. (2023). Microscale and macroscale deformation behavior of electrospun polymeric nanofiber membranes using in situ sem during mechanical testing. *Polymers*, 15(7), 1630.

Wang, C., Wang, J., Zeng, L., Qiao, Z., Liu, X., Liu, H., ... & Ding, J. (2019). Fabrication of electrospun polymer nanofibers with diverse morphologies. *Molecules*, 24(5), 834.

Wang, Y., Li, X., & Liu, Y. (2023). Electrospinning setup and mechanism: A review. *Journal of Nanomaterials*.

Wortmann, M., Layland, A. S., Frese, N., ve ark. (2020). On the reliability of highly magnified micrographs for structural analysis in materials science. *Nanoscale*, 12, 9673–9686.

Ullah, S., Hashmi, M., Shi, J., & Kim, I. S. (2023). Fabrication of electrospun PVA/zein/gelatin based active packaging for quality maintenance of different food items. *Polymers*, 15(11), 2538. <https://doi.org/10.3390/polym15112538>

Yusro, M., & Hacker, V. (2024). Insight into aligned nanofibers improving fuel cell performances: strategies, rationalities, and opportunities. *Materials Advances*, 5(12), 4974-4995.

Zelča, Z., Merijs-Meri, R., Krumme, A., ve ark. (2023). Electrospun fibrous materials with propolis extracts for edible food packagings. *Polymers*, 15.

Zhang, M., Ahmed, A., & Xu, L. (2023a). Electrospun nanofibers for biomedical applications: A review. *Materials Science and Engineering: C*, 116, 111162.

BÖLÜM 5

FONKSİYONEL GIDA OLARAK ARI ÜRÜNLERİ VE BİYOAKTİF ÖZELLİKLERİ

DAVUT KARAHAN¹

Giriş

İnsanlar, diğer canlılarda olduğu gibi yaşamlarını sürdürebilmek ve fizyolojik gereksinimlerini karşılayabilmek için enerjiye ve belirli besin öğelerine (karbonhidratlar, yağlar, proteinler vb.) ihtiyaç duymaktadır (Özay Arancioğlu, 2021). Proteinler, karbonhidratlar ve lipitler, organizmada başta enerji sağlanması olmak üzere metabolik süreçlerin düzenlenmesinde temel rol oynayan besin bileşenleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte gıdalar, hücrelerin korunması, yenilenmesi ve çoğalması gibi biyolojik süreçlerde görev alan bu temel bileşenlerin yanı sıra, çeşitli biyoaktif maddeleri de bünyelerinde barındırmaktadır.

Temel besin öğeleri dışında kalan bu biyoaktif bileşenler arasında; antosiyaninler, aromatik maddeler, fenolik bileşikler, flavonoidler, polifenoller ve organik asitler gibi ikincil metabolitler öne çıkmaktadır (Barba & ark., 2019). Son yıllarda hastalıkların artış

¹Arı ve Arı Ürünleri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye. Orcid: 0000-0003-4571-1095

göstermesi, yaşam standartlarının yükselmesi ve bilgiye erişimin kolaylaşması, bireylerin sağlıkla doğrudan ilişkili olan beslenme konusuna daha fazla önem vermesine yol açmıştır. Bu durum, tüketilen gıdaların yalnızca besin değerleri açısından değil, aynı zamanda kalite ve güvenlik yönünden de daha dikkatle değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Gıdaların içerdiği biyoaktif bileşenler dikkate alındığında, bu bileşikler hem bilimsel çalışmalar hem de tüketici tercihleri açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Fonksiyonel gıdanın tanımı şu şekilde yapılmaktadır; vücudun temel besin ihtiyacını karşılamasının yanı sıra metabolizma üzerinde ekstra faydalar sağlayan, dolayısıyla bağışıklığın artmasında, hastalıklardan korunmada ve daha sağlıklı bir yaşama ulaşmak amacıyla aktivite gösteren gıdalar veya gıda bileşenleridir. Yapılan araştırmalar, arı ürünlerinin (polen, propolis, arı ekmeği, arı sütü ve balmumu) biyolojik aktivite gösteren biyoaktif bileşikler bakımından zengin ve önemli kaynaklar olduğunu ortaya koymaktadır. Son zamanlarda, antimikrobiyal, anti-inflamatuar, antioksidan, antikanser, bağışıklık düzenleyici, antidiyabetik, hipotansiyon ve anti-alerjik özellikler gibi biyolojik aktivitelerini değerlendirmeye başlanan birkaç çalışma bulunmaktadır. Bu biyoaktif özellikler, arı ürünlerini fonksiyonel gıdalarda kullanımını ve biyoaktif moleküllerin kaynaklarının sembolik örnekleri haline getirmektedir. Ancak bu değerli özelliklere rağmen arı ürünleri hala insan tedavisi sisteminde aktif olarak kullanılmamaktadır. Bunun sebepleri arasından;

- Bileşimlerinin standartlaştırılmaması
- Bileşimlerinin çeşitli parametrelere (coğrafi bölge, iklim koşulları, bitki kaynağı, ekstraksiyon ve analiz yöntemleri vb.) bağlı olarak büyük değişkenlik göstermesi

- Klinik çalışmalardan alınan güvenlik, alerji ve toksisite ile ilgili verilerin azlığı
- Kullanım miktarları veya terapötik etkinliği sayılabilir (Giampieri & ark., 2022).

İnsanların en çok bildiği ve tükettiği bal arısı ürünü, çoklu biyolojik aktivitelere sahip besin ve biyoaktif bileşiklerin karmaşık bir karışımı olan baldır. Ancak arıların bal dışında;

- Arı poleni
- Propolis
- Arı ekmeği
- Arı sütü
- Arı zehri
- Apilarnil ve
- Balmumu gibi ürünleri de son derece kıymetlidir (Battino & ark., 2021).

Bal

Codex Alimentarius (2001) tanımına göre bal; bal arılarının (*Apis mellifera L.*) bitkilerin nektarlarından, bitkilerin canlı kısımlarının salgılarından veya bu kısımlar üzerinde yaşayan emici böceklerin salgılarından topladığı maddeleri, kendi enzimatik salgılarıyla işleyerek dönüştürdüğü, depoladığı ve olgunlaşması amacıyla petek gözlerinde muhafaza ettiği doğal, yoğun ve tatlı bir üründür (Anonim, 2001).

Bal, bileşiminde ağırlıklı olarak fruktoz ve glikoz başta olmak üzere monosakkaritler, disakkaritler, trisakkaritler ve oligosakkaritler içeren; karbonhidratların toplam içeriğin yaklaşık %70'ini oluşturduğu bir gıda maddesidir. Bunun yanı sıra yapısında ortalama %18 oranında su ile birlikte enzimler, mineral maddeler,

organik asitler, fenolik asitler, polifenoller, çeşitli makro ve mikro elementler, vitaminler ve flavonoidler bulunmaktadır. Özellikle fenolik asitler ve flavonoidleri kapsayan polifenolik bileşikler, balın antioksidan kapasitesinde temel rol oynayan biyoaktif bileşenler olarak kabul edilmektedir (Giampieri & ark., 2022).

Balın içerdiği biyoaktif maddelerin miktarı ve çeşitliliği; nektarın botanik kaynağı, iklimsel koşullar, yetiştirme rakımı, polen kompozisyonu ve coğrafi köken gibi birçok çevresel ve biyolojik faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Jibril & ark., 2019; Seeley, 2009). Apis cinsi arılar çoğunlukla tek bir bitki türünden nektar topladığında ortaya çıkan ballar monofloral bal olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde ticari olarak sunulan balların önemli bir bölümü monofloral nitelikte olup, adlandırmaları kaynak bitkiye göre yapılmaktadır. Örneğin manuka balı, *Leptospermum scoparium* bitkisinden elde edilen nektara dayanmaktadır. Benzer şekilde yonca, avokado, pamuk, akasya, adaçayı ve tualang balı gibi ballar da köken aldıkları bitki türlerine göre isimlendirilmektedir. Buna karşılık, arıların farklı bitki türlerinden nektar toplaması sonucu elde edilen ballar multifloral bal olarak tanımlanmaktadır. Monofloral ve multifloral balların insan sağlığı üzerindeki göreceli etkileri ile hangi bal türünün daha güçlü terapötik özellikler taşıdığına yönelik araştırmalar halen sürmektedir (Jibril & ark., 2019).

Bal, tarihsel süreçte Antik Çağ'dan itibaren Arap, Mısır ve Hint uygarlıklarında yalnızca besin kaynağı olarak değil, aynı zamanda tedavi edici bir ajan olarak da yaygın biçimde kullanılmıştır. O dönemde bal; kraliyet sofralarında sunulan değerli bir armağan, içecek, doğal tatlandırıcı ve koruyucu olmasının yanı sıra boğaz enfeksiyonları, cilt lezyonları, yaralar, döküntüler ve öksürük gibi rahatsızlıkların giderilmesinde de kullanılmıştır (Molan, 2006).

Günümüzde yapılan bilimsel çalışmalar, balın sağlık üzerindeki olumlu etkilerini ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. Bu

çalışmalar balın geniş spektrumlu antibakteriyel aktiviteye sahip olduğunu ve bunun yanı sıra antiinflamatuvar, antikanser, antitümör, antiviral, hepatoprotektif ve kardiyoprotektif etkiler gösterebildiğini desteklemektedir (Yaghoobi & ark., 2008; Bobiş & ark., 2018)

Yapılan araştırmalarda balın, elliden fazla Gram pozitif (+) ve Gram negatif (–) bakteri türü üzerinde inhibitör etki oluşturduğu bildirilmektedir. Bu antimikrobiyal etkinin; balın yüksek şeker içeriği, düşük su aktivitesi, asidik pH değeri, hidrojen peroksit üretimi, metilglioksal varlığı ve zengin fitokimyasal bileşen profili gibi çok sayıda faktörün birleşik etkisinden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Blasa & ark., 2006).

Arı Poleni

Türk Gıda Kodeksi (TGK) Arı Ürünleri Tebliği'nde (Tebliğ No: 2024/6) arı poleni, işçi bal arılarının çiçekli bitkilerdeki polenleri toplayıp kendi bünyelerindeki salgıladığı salgılar ile muamele ettikten sonra küre şeklinde farklı renklerde peletler haline getirdiği ve kovan girişinde kurulan tuzaklar yardımıyla hasat edilen arı ürünü olarak tanımlamaktadır (Anonim, 2024). Şekil 1'de farklı renklere sahip polen örnekleri sunulmuştur.

Şekil 1 Farklı renklere sahip polen örnekleri



Kaynak: Krell, 1996

Türk Gıda Kodeksi Arı Ürünleri Tebliği'ne göre arı polenin taşınması gereken özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Arı poleni özellikleri

Özellik	Arı Poleni	Kurutulmuş Arı Poleni
Rutubet (%m/m, en fazla)	22	10
Protein (% m/m, kuru maddede)	15-30	15-30
Kül (% m/m, kuru maddede en fazla)	3,5	3,5
Glukoz + Fruktöz (% m/m, kuru maddede en fazla)	45	45
Toplam yağ (% m/m, kuru maddede en az)	2,6	2,6

Kaynak: TGG, 2024

Arı poleni, karbonhidrat içeriği bakımından zengin bir doğal üründür ve kuru maddesinin yaklaşık üçte ikisi karbonhidratlardan oluşmaktadır. Bu karbonhidratlar, polen peletlerinin oluşumu sırasında bağlayıcı olarak kullanılan bal veya nektar kaynaklı bileşenlerden sağlanmaktadır (Li & ark., 2018; Aylanc & ark., 2021).

Polenin temel biyolojik rolü, arı kolonisi için bir besin rezervi oluşturarak koloninin gelişimini ve sürekliliğini desteklemektir. Bileşimi incelendiğinde arı polenin; proteinler, esansiyel amino asitler, vitaminler ve yağ asitleri gibi besleyici öğelerin yanı sıra, fonksiyonel özellikler gösteren ve güçlü antioksidan aktiviteye sahip pigmentler (özellikle karotenoidler) ile polifenolik bileşikler de içerdiği görülmektedir. Arı polenin kimyasal profili; nektarın elde edildiği bitki türü, coğrafi köken ve hasadın gerçekleştirildiği yılın mevsimsel koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle söz konusu bileşiklerin miktarları ve dağılımları polen örnekleri arasında farklılık gösterebilmektedir (Kieliszek & ark., 2018; Thakur & Nanda, 2020).

Proteinler, arı poleninde karbonhidratlardan sonra en yüksek oranda bulunan makro besin bileşenleri arasında yer almakta olup,

kuru ağırlığın yaklaşık %10–40'ını oluşturmaktadır. Proteinler, yalnızca besleyici özellikleriyle değil, aynı zamanda ürünün duyuasal özellikleri üzerinde, özellikle tat profilinin şekillenmesinde de etkili olmaktadır. Arı polenin protein içeriği, kaynağını oluşturan bitki türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmekte; hatta aynı bitki türüne ait örnekler arasında dahi, farklı coğrafi bölgelerden toplanmaları durumunda belirgin farklılıklar gözlenebilmektedir (Aylanc & ark., 2021).

Amino asit bileşimi açısından değerlendirildiğinde; glutamik asit, prolin, aspartik asit ile birlikte lösin, lizin, treonin, histidin, tirozin ve özellikle triptofan, farklı bitki türleri ve coğrafi kökenlerden elde edilen arı poleni örneklerinde baskın amino asitler olarak rapor edilmiştir. Bununla birlikte, diğer amino asitlerin de içerik düzeyleri bakımından dikkat çekici katkılar sunduğu belirtilmektedir. Arı poleninde bulunan toplam esansiyel amino asit miktarının, toplam amino asit içeriğinin %12 ile %45,02'si arasında değiştiği bildirilmektedir. Bu özellik, arı polenini önemli bir protein ve amino asit kaynağı haline getirerek, özellikle vejetaryen bireyler ve sporcular için yenilikçi bir fonksiyonel gıda takviyesi olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Thakur & Nanda, 2020; Alvarez-Suarez, 2017).

Karbonhidratlar ve proteinlerin yanı sıra lipidler de arı polenin besin değerine önemli katkı sağlayan temel bileşenler arasında yer almaktadır. Güncel çalışmalar, farklı bitki türlerinden elde edilen polen örneklerinde toplam lipid içeriğinin kuru ağırlık üzerinden değerlendirildiğinde %24,4'e kadar ulaşabildiğini göstermektedir (De-Melo & ark., 2018; Martins, 2011).

Arı poleni; β -karoten ve tokoferoller (E vitamini) bakımından zengin olup, A vitamini gibi yağda çözünen vitaminlerin yanı sıra, daha düşük oranlarda olmakla birlikte bazı suda çözünebilir vitaminleri ve C vitaminini de içeren değerli bir doğal kaynak olarak kabul edilmektedir (De-Melo & ark., 2018).

Bununla birlikte arı poleni, çiçeklenme kaynağı ve coğrafi kökene bağlı olarak değişkenlik gösteren önemli miktarda makro ve mikro element içermektedir. Bu değişkenliğin temel belirleyicilerinden birinin, polenin toplandığı bölgedeki toprak yapısı olduğu ileri sürülmektedir. Arı poleninde bu kapsamda 25'e kadar farklı mineral bileşenin varlığı rapor edilmiş olup; potasyum (K), kalsiyum (Ca), fosfor (P), magnezyum (Mg), sodyum (Na), çinko (Zn), demir (Fe), manganez (Mn), bakır (Cu) ve selenyum (Se) en sık bildirilen elementler arasında yer almaktadır (Kastrati & ark., 2021).

Besleyici değerinin ötesinde, arı poleni kimyasal bileşimiyle doğrudan ilişkili çeşitli potansiyel terapötik özellikler de sergilemektedir. Özellikle polifenolik bileşenler bakımından zengin olması nedeniyle, hem *in vitro* hem de *in vivo* çalışmalarda arı polenin güçlü antioksidan aktiviteye sahip olduğu ortaya konulmuştur (Soares de Arruda & ark., 2021; Oyarzún & ark., 2020).

Buna ek olarak, arı polenin belirgin antiinflamatuvar etkilere sahip olduğu bildirilmektedir. *In vitro* modellerde yürütülen çalışmalar, bu etkinin arı poleninde bulunan biyoaktif bileşiklerin proinflamatuvar sitokinlerin sentezini baskılamasıyla ilişkili olduğunu göstermektedir (Saisavoey & ark., 2021). Aynı zamanda arı polenin, inflamasyonla ilişkili gen ekspresyonunu düzenleyebildiği ve mitojenle aktive edilen protein kinaz sinyal yollarının aktivasyonunu inhibe edebildiği de rapor edilmiştir (Li & ark., 2019).

Arı poleni tüketiminin kardiyovasküler sistem üzerindeki olumlu etkileri, kolesterol, triasilgliserol ve toplam lipid düzeylerinde azalma ile karakterize edilen hipolipidemik aktivitesiyle ilişkilendirilmektedir. Düzenli arı poleni alımının, insülin, testosteron ve tiroksin gibi hormon düzeyleriyle ilişkili olarak kan lipid profilini anlamlı derecede iyileştirdiği bildirilmektedir (Komosinska-Vassev & ark., 2015).

Her ne kadar bazı bireylerde alerjik reaksiyonlarla ilişkilendirilebilse de, arı poleninin rinit ve astım gibi belirli alerjik durumların hafifletilmesinde ve hatta önlenmesinde potansiyel bir destekleyici olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir (Giampieri ve ark., 2022).

Bunun yanı sıra arı poleninin, *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis* ve *Staphylococcus aureus* gibi bazı Gram-pozitif ve Gram-negatif patojen bakterilere karşı olduğu kadar, çeşitli maya ve mantar suşlarına karşı da antimikrobiyal aktivite gösterdiği ortaya konulmuştur (Kačániová & ark., 2012).

Arı Ekmeği (Perga)

Türk Gıda Kodeksi (TGK) Arı Ürünleri Tebliği'nde (Tebliğ No: 2024/6) arı ekmeği, arı kolonisi ortamında arıların doğadan topladığı polenleri petek gözlerinde depoladıktan sonra poleninin fermantasyon sonucu oluşan arı ürünü olarak tanımlanmıştır. Petek hücrelerinde depolanmış arı ekmeği Şekil 2'de, ayıklanmış arı ekmeği de Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 2. Petek hücrelerinde depolanmış arı ekmeği



Kaynak: Fuenmayor & ark., 2014

Şekil 3. Petek hücrelerinden çıkarılmış arı ekmeği



Kaynak: Kieliszek & ark., 2018

Petek gözlerine depolanan polen; uygun sıcaklık ve nem koşulları altında, arıların bezlerinden salınan çeşitli enzimlerin aktivitesi ile mikroorganizmaların etkisi sonucu yaklaşık 14 günlük bir süreç sonunda pergaya dönüşmektedir. Perga, özellikle kış ve erken ilkbahar dönemlerinde bal ile birlikte arı kolonisi için temel besin kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Genç ve işçi arılar, larvaların arı sütü ile beslenebilmesi için pergayı aktif olarak kullanmaktadır (Kieliszek & ark., 2018, Aylanc & ark., 2021). Türk Gıda Kodeksi Arı Ürünleri Tebliği'ne göre arı ekmeğinin taşıması gereken özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Arı ekmeği özellikleri

Özellik	Arı Ekmeği
Rutubet (%m/m, en fazla)	14
Protein (% m/m, kuru maddede)	15-30
Kül (% m/m, kuru maddede en fazla)	3,5
Glukoz + Fruktöz (% m/m, kuru maddede en fazla)	40
Toplam yağ (% m/m, kuru maddede en az)	2,6

Kaynak: TGG, 2024

Arı ekmeğinin antioksidan kapasite açısından bal ve propolis ile karşılaştırılabilir düzeyde yüksek aktiviteye sahip olduğu

bildirilmiştir (Bakour & ark., 2019). Perganın antimikrobiyal özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, bu ürünün farklı bakteri ve mantar türlerine karşı etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bakour ve ark. (2019), çeşitli mikroorganizma suşlarının BB ekstraktlarına duyarlılık gösterdiğini rapor etmiş; ayrıca BB özlerinin Gram-pozitif bakteriler üzerinde, Gram-negatif bakterilere kıyasla daha güçlü bir inhibitör etki sergilediği belirtilmiştir (Pelka & ark., 2021).

Bunun yanı sıra, Perganın antitümöral potansiyeli *in vitro* modellerde değerlendirilmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Markiewicz-Zukowska & ark., 2013). Ayrıca antiinflamatuvar ve immünomodülatör etkileri, antihipertansif aktivitesi, hipolipidemik özellikleri ve hepatoprotektif etkileri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar da Perganın fonksiyonel ve terapötik potansiyelini desteklemektedir (Khalifa & ark., 2020).

Arı Sütü

Genç işçi arılarının hipofarenjiyal ve mandibular bezlerinden salgılanan, pelte kıvamında, açık krem-kemik renginde, kendine özgü koku ve tada sahip, larva içermeyen arı ürünü olarak tanımlanmaktadır (TGK, 2024).

Arı sütü (RJ), işçi arı larvalarının gelişiminin ilk üç günü boyunca, kraliçe arıların ise yaşamları süresince temel besin kaynağı olarak kullanılmaktadır (Ramadan & Al-Ghamdi 2012). Kimyasal ve besinsel bileşimi incelendiğinde RJ'nin büyük oranda sudan (%60–70) oluştuğu; bunun yanı sıra karbonhidratlar, proteinler ve serbest amino asitler, lipidler, mineral maddeler, vitaminler ve polifenolik bileşikler içerdiği görülmektedir (Balkanska & ark., 2014).

Farklı coğrafi kökenlerden elde edilen arı sütü örneklerinin, hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakteri türleri üzerinde inhibitör etki gösterdiği; ayrıca çeşitli *in vitro* ve *in vivo* deneysel

modellerde belirgin antiinflamatuvar ve antioksidan aktiviteler sergilediği bildirilmiştir (Viuda-Martos & ark., 2017).

Özellikle arı sütünün karakteristik lipid fraksiyonunu oluşturan 10-hidroksi-2-dekenoik asit (10-HDA), östrojenik etki, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar aktivite, antitümör potansiyel ve immünomodülatör özellikler gibi çok sayıda biyolojik etkiyle ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte 10-HDA'nın, diyet kısıtlaması benzeri fizyolojik etkilerle bağlantılı olabileceği de rapor edilmektedir (Peng & ark., 2017).

Sonuç

Sonuç olarak arı ürünleri; zengin besin içerikleri ve biyoaktif bileşenleri sayesinde hem beslenme hem de sağlık açısından oldukça önem taşımaktadır. Bal, arı poleni, perga (arı ekmeği) ve arı sütü gibi ürünler; proteinler, karbonhidratlar, lipidler, vitaminler, mineraller ve polifenoller başta olmak üzere çok sayıda biyoaktif bileşiği bünyelerinde barındırmakta ve bu özellikleriyle antioksidan, antimikrobiyal, antiinflamatuvar gibi etkiler gösterebilmektedir. Ancak bu biyolojik aktivitelerin düzeyi botanik köken, coğrafi bölge, çevresel koşullar ve işlenme prosesleri gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalarda mevcut bulgular, arı ürünlerinin fonksiyonel gıda ve doğal destekleyici ürünler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymakla birlikte, bu etkilerin mekanizmalarının daha ayrıntılı biçimde aydınlatılması ve klinik çalışmalarla desteklenmesi gerekliliğini de göstermektedir. Bu bağlamda, arı ürünlerinin standardizasyonu, biyoyararlanımı ve güvenli kullanımına yönelik ileri araştırmaların yapılması büyük önem taşımaktadır.

Kaynakça

Giampieri, F., Quiles, J. L., Cianciosi, D., Forbes-Hernández, T. Y., Orantes-Bermejo, F. J., Alvarez-Suarez, J. M., & Battino, M. (2022). Bee products: an emblematic example of underutilized sources of bioactive compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, 70(23), 6833-6848.

Battino, M., Giampieri, F., Cianciosi, D., Ansary, J., Chen, X., Zhang, D., ... & Forbes-Hernández, T. (2021). The roles of strawberry and honey phytochemicals on human health: A possible clue on the molecular mechanisms involved in the prevention of oxidative stress and inflammation. *Phytomedicine*, 86, 153170.

Kieliszek, M., Piwowarek, K., Kot, A. M., Błażej, S., Chlebowska-Śmigiel, A., & Wolska, I. (2018). Pollen and bee bread as new health-oriented products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 170-180.

Thakur, M., & Nanda, V. (2020). Composition and functionality of bee pollen: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 82-106.

Özay Arancioğlu, İ. (2021). Farklı kurutma yöntemlerinin nar tanelerinin biyoaktif bileşenleri, in vitro biyoerişilebilirliği, renk ve yapısal özelliklerine etkisi (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Barba, F. J., Saraiva, J. M., Cravotto, G., & Lorenzo, J. M. (Eds.). (2019). *Innovative thermal and non-thermal processing, bioaccessibility and bioavailability of nutrients and bioactive compounds*. Woodhead Publishing.

Codex Alimentarius STANDARD FOR HONEY CXS 12- (1981). <https://www.kisa.link/CHXUM>

Jibril, F. I., Hilmi, A. B. M., Manivannan, L. (2019). Isolation and characterization of polyphenols in natural honey for the treatment of human diseases. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 1-9.

Seeley, T.D. (2009). *The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies*. Harvard University Press

Molan, P.C. (2006). The evidence supporting the use of honey as a wound dressing. *Int J Low Extrem Wounds* 5:40–54

Yaghoobi, N., Al-Waili, N., Ghayour-Mobarhan, M., Parizadeh, S. M. R., Abasalti, Z., Yaghoobi, Z., Ferns, G. A.A. (2008). Natural honey and cardiovascular risk factors; effects on blood glucose, cholesterol, triacylglycerole, CRP, and body weight compared with sucrose. *TheScientificWorldJournal*, 8, 463-469.

Bobiş, O., Dezmirean, D. S., Moise, A.R. (2018). Honey and diabetes: the importance of natural simple sugars in diet for preventing and treating different type of diabetes. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018.

Blasa, M., Candiracci, M., Accorsi, A., Piacentini, M.P., Albertini, M.C., Piatti, E. 2006. “Raw millefiori honey is packed full of antioxidants”, *Food Chem*, 97, 217–222.

Li, Q. Q., Wang, K., Marcucci, M. C., Sawaya, A. C. H. F., Hu, L., Xue, X. F., ... & Hu, F. L. (2018). Nutrient-rich bee pollen: A treasure trove of active natural metabolites. *Journal of Functional Foods*, 49, 472-484.

Aylanc, V., Falcão, S. I., Ertosun, S., & Vilas-Boas, M. (2021). From the hive to the table: Nutrition value, digestibility and bioavailability of the dietary phytochemicals present in the bee pollen and bee bread. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 464-481.

Alvarez-Suarez, J. M. (Ed.). (2017). *Bee products-chemical and biological properties* (pp. 1-306). Basel, Switzerland:: Springer International Publishing.

De-Melo, A. A. M., Estevinho, L. M., Moreira, M. M., Delerue-Matos, C., de Freitas, A. D. S., Barth, O. M., & de Almeida-Muradian, L. B. (2018). A multivariate approach based on physicochemical parameters and biological potential for the botanical and geographical discrimination of Brazilian bee pollen. *Food Bioscience*, 25, 91-110.

Martins, M. C. (2011). Physicochemical composition of bee pollen from eleven Brazilian states.

Kastrati, G., Paçarizi, M., Sopaj, F., Tašev, K., Stafilov, T., & Mustafa, M. K. (2021). Investigation of concentration and distribution of elements in three environmental compartments in the region of Mitrovica, Kosovo: Soil, honey and bee pollen. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2269.

Soares de Arruda, V. A., Vieria dos Santos, A., Figueiredo Sampaio, D., da Silva Araujo, E., de Castro Peixoto, A. L., Estevinho, L. M., & de Almeida-Muradian, L. B. (2021). Brazilian bee pollen: phenolic content, antioxidant properties and antimicrobial activity. *Journal of Apicultural Research*, 60(5), 775-783.

Oyarzún, J. E., Andia, M. E., Uribe, S., Núñez Pizarro, P., Núñez, G., Montenegro, G., & Bridi, R. (2020). Honeybee pollen extracts reduce oxidative stress and steatosis in hepatic cells. *Molecules*, 26(1), 6.

Saisavoey, T., Sangtanoo, P., Chanchao, C., Reamtong, O., & Karnchanatat, A. (2021). Identification of novel anti-inflammatory peptides from bee pollen (*Apis mellifera*) hydrolysate in

lipopolysaccharide-stimulated RAW264. 7 macrophages. *Journal of Apicultural Research*, 60(2), 280-289.

Li, Q., Sun, M., Wan, Z., Liang, J., Betti, M., Hrynets, Y., ... & Wang, K. (2019). Bee pollen extracts modulate serum metabolism in lipopolysaccharide-induced acute lung injury mice with anti-inflammatory effects. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(28), 7855-7868.

Komosinska-Vassev, K., Olczyk, P., Kaźmierczak, J., Mencner, L., & Olczyk, K. (2015). Bee pollen: chemical composition and therapeutic application. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015(1), 297425.

Kačániová, M., Vukovic, N., Chlebo, R., Hascik, P., Rovna, K., Cubon, J., ... & Pasternakiewicz, A. (2012). The antimicrobial activity of honey, bee pollen loads and beeswax from Slovakia

Bakour, M., Fernandes, Â., Barros, L., Sokovic, M., & Ferreira, I. C. (2019). Bee bread as a functional product: Chemical composition and bioactive properties. *Lwt*, 109, 276-282.

Pełka, K., Otłowska, O., Worobo, R. W., & Szweda, P. (2021). Bee bread exhibits higher antimicrobial potential compared to bee pollen. *Antibiotics*, 10(2), 125.

Markiewicz-Zukowska, R., Naliwajko, S. K., Bartosiuk, E., Moskwa, J., Isidorov, V., Soroczynska, J., & Borawska, M. H. (2013). Chemical composition and antioxidant activity of beebread, and its influence on the glioblastoma cell line (U87MG). *Journal of Apicultural Science*, 57(2), 147.

Khalifa, S. A., Elashal, M., Kieliszek, M., Ghazala, N. E., Farag, M. A., Saeed, A., ... & El-Seedi, H. R. (2020). Recent insights into chemical and pharmacological studies of bee bread. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 300-316.

Ramadan, M. F., & Al-Ghamdi, A. (2012). Bioactive compounds and health-promoting properties of royal jelly: A review. *Journal of functional foods*, 4(1), 39-52.

Balkanska, R., Karadjova, I., & Ignatova, M. (2014). Comparative analyses of chemical composition of royal jelly and drone brood. *Bulg. Chem. Commun*, 46(2), 412-416.

Viuda-Martos, M., Perez-Alvarez, J. A., & Fernandez-Lopez, J. (2017). Royal JellyL Health Benefits and Uses in Medicine In Book, Bee Products: Chemical and Biological Properties.

Peng, C. C., Sun, H. T., Lin, I. P., Kuo, P. C., & Li, J. C. (2017). The functional property of royal jelly 10-hydroxy-2-decenoic acid as a melanogenesis inhibitor. *BMC complementary and alternative medicine*, 17(1), 392.

BÖLÜM 6

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, SU KAYNAKLARI VE SAĞLIKLI BESLENME

EZGİ KURTULMUŞ¹
TÜLAY ELAL MUŞ¹

Giriş

İklim değışikliğı, günümüzün en önemli küresel sorunlarından biri olarak yalnızca sıcaklık ve hava olaylarındaki değışimlerle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda su kaynaklarının mevcudiyetini, tarımsal üretim süreçlerini ve dolaylı olarak insan beslenmesini derin biçimde etkilemektedir. Küresel ölçekte yapılan değerlendirmeler, artan sıcaklıklar ve değışen yağış düzenlerinin suya erişimi zorlaştırdığını, bunun da tarımsal verimlilik, ürün çeşitliliğı ve gıda arzı üzerinde belirgin baskılar oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Li, 2021; Wheeler & von Braun, 2013). Suya dayalı üretim sistemlerinde yaşanan bu kırılganlık, gıda güvenliğı ile birlikte beslenme kalitesini de tehdit etmekte; özellikle iklim değışikliğine duyarlı bölgelerde toplumların yeterli ve dengeli beslenme olanaklarını sınırlandırmaktadır (Myers & ark., 2017).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Orcid: 0000-0003-2535-2566

² Doç. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Orcid: 0000-0002-3943-0097

Tarım sektörü, küresel tatlı su kullanımının en büyük payını oluşturmakta olup, su kaynakları üzerindeki artan baskılar yalnızca kullanılabilir su miktarını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda su kalitesini olumsuz etkileyerek sulama, hayvancılık faaliyetleri ve gıda işleme süreçlerini daha hassas ve kırılgan bir yapıya dönüştürmektedir. Mekonnen ve Hoekstra'nın gerçekleştirdiği kapsamlı su ayak izi analizleri, farklı ürünlerin ve ülkelerin su tüketim yapılarını ayrıntılı biçimde ortaya koymakta; böylece suyun küresel gıda tedarik zincirindeki belirleyici konumunu açıkça göstermektedir. Bu bulgular, iklim değişikliğiyle ilişkili su kıtlığı derinleştğinde gıda güvenliğinin nasıl hızlı ve çok boyutlu bir şekilde risk altına girebileceğini ortaya koyması açısından büyük önem taşımaktadır (Hoekstra & ark., 2012).

Ayrıca, beslenme alışkanlıkları hem çevresel etkilerin oluşumunda hem de toplum sağlığının şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Son yıllarda yürütülen çok sayıda araştırma, özellikle kırmızı et ve yüksek oranda işlenmiş ürünlerin ağırlıkta olduğu diyetlerin sera gazı salınımlarını, su ve arazi kullanımını arttırdığı ve ekolojik baskıları derinleştirdiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, bitkisel kaynaklı gıdaların temel alındığı, mevsimselliği ve yerel üretimi önceleyen beslenme modellerinin hem çevresel yükleri azaltma potansiyeline sahip olduğu hem de kardiyometabolik hastalıklar dâhil birçok kronik hastalık riskini düşürdüğü gösterilmektedir. Bu ilişkiye yönelik yapılan sayısal ve nitel değerlendirmeler, beslenme alışkanlıklarında gerçekleştirilecek değişimlerin hem iklimle ilgili hedeflere ulaşmada hem de halk sağlığını iyileştirmede etkili bir araç olabileceğini güçlü biçimde desteklemektedir (Tilman & Clark., 2014).

İklim değişikliğinin sağlık üzerindeki etkileri, çoğu zaman yalnızca sıcak hava dalgaları ya da aşırı hava olaylarıyla ilişkilendirilse de aslında konu çok daha geniş bir çerçevede ele alınmalıdır. Artan sıcaklıkların tarımsal verim üzerine baskı

oluşturduğu, birçok ürünün besin değeri ve bileşiminin değiştiği, bunun da doğrudan gıda güvenliğini ve toplumun beslenme durumunu etkilediği çeşitli çalışmalarda ortaya konmuştur. Özellikle Lancet Countdown gibi uluslararası değerlendirmeler, iklim koşullarındaki değişimlerin sağlık risklerini belirgin biçimde artırdığını; yetersiz beslenmeye eğilimli veya sosyoekonomik açıdan dezavantajlı gruplarda bu etkilerin daha da belirginleştiğini göstermektedir. Bu durum, tarımsal üretimden sofraya uzanan zincirin her aşamasında iklim değişikliğinin dolaylı ama güçlü bir etkisinin bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Springmann & ark., 2016).

Bu bölümün amacı, iklim değişikliği ile su kaynakları ve sağlıklı beslenme arasındaki çok yönlü ilişkiyi ortaya koymak; bu konuda yapılan çalışmalardan elde edilen temel bilgileri özetlemek ve sonraki bölümlerde ele alınacak önerilere zemin hazırlamaktır. Devam eden kısımlarda önce iklim değişikliğinin su miktarı, suyun mevsimsel dağılımı ve tarımsal üretim üzerindeki etkileri ele alınacak; ardından su kullanımı, gıda üretimi ve beslenme alışkanlıkları arasındaki bağlantılar değerlendirilecektir. Son olarak, sağlıklı beslenmenin desteklenmesi ve suyun daha doğru kullanılması için uygulanabilecek yöntemler üzerinde durulacaktır.

Değişen İklim Koşullarında Su Kaynaklarının Durumu

İklim değişikliği, küresel ölçekte su varlığını ve suyun dağılımını etkileyen en önemli çevresel süreçlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Artan sıcaklıklar, yağışların zamansal ve mekânsal dağılımındaki değişimler ile aşırı hava olaylarının daha sık görülmesi hem yüzey sularının hem de yeraltı su kaynaklarının miktarını ve kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Lee & ark; 2023). Bu gelişmeler, özellikle tarımsal üretimin büyük ölçüde suya bağımlı olduğu ve nüfus artışının su talebini artırdığı günümüz

koşullarında, su güvenliğini küresel ölçekte daha kırılgan bir duruma getirmektedir.

Küresel ölçekte artan sıcaklıklar, buharlaşma hızlarının yükselmesine ve atmosferin daha fazla su buharı tutabilmesine neden olmaktadır. Bu süreç, bazı bölgelerde kısa süreli ve yoğun yağışların artmasına ve buna bağlı taşkın risklerinin yükselmesine yol açarken, diğer bölgelerde ise yağışların azalması ve daha uzun süreli kuraklık koşullarının ortaya çıkmasıyla sonuçlanmaktadır (Trenberth., 2011). Bununla birlikte yağışların yıl içindeki dağılımı da belirgin biçimde değişmekte; kar örtüsünün azalması ve karların daha erken erimesi, özellikle yarı kurak ve dağlık havzalarda suyun yıl boyunca dengeli bir şekilde kullanılmasını güçleştirmektedir.

Birçok havzada sıcaklık artışı ve artan buharlaşma koşulları, akarsu debilerinde belirgin azalmalarla sonuçlanmıştır. Özellikle Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Akdeniz Havzası'nda yer alan ülkelerde, son on yıllar içinde yeraltı su seviyelerinde önemli düşüşler gözlemlendiği çok sayıda çalışmada ortaya konmuştur (Gleeson & ark., 2012; Wada & ark., 2010). Tarımsal üretimde sulama ihtiyacının artması, özellikle suya bağımlı bölgelerde yeraltı sularının aşırı çekilmesine yol açmış; bu durum, yenilenme hızını aşan kullanım nedeniyle birçok akiferde geri dönüşü zor ve uzun vadeli kayıplar yaratmıştır (Döll & ark., 2012; Rodell & ark., 2018). Bununla birlikte, baraj ve doğal göl seviyelerindeki düşüşler yalnızca tarımsal sulamayı değil, aynı zamanda içme-kullanma suyu teminini ve hidroelektrik enerji üretimini de tehdit eden kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Haddeland & ark., 2014).

Artan sıcaklıklar, su ortamlarında gerçekleşen mikrobiyolojik ve kimyasal süreçleri hızlandırarak su kalitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturmaktadır. Özellikle sıcaklık artışı, patojen mikroorganizmaların çoğalma hızını artırmakta ve bu durum yüzey sularında sağlık risklerinin yükselmesine yol açmaktadır (Lipp & ark., 2002; Rose & ark., 2001). Aynı zamanda daha sıcak ve

durağan su koşulları, ötrofikasyonu teşvik ederek alg ve siyanobakteri patlamalarının sıklığını ve süresini artırmaktadır (Paerl & Huisman.,2009; O’Neil & ark., 2012). Düşük akım ve kuraklık dönemlerinde ise su kütlelerinde seyreltme kapasitesinin azalması, ağır metaller ve organik kirleticiler gibi toksik maddelerin yoğunlaşmasına neden olmaktadır (Delpla & ark., 2009). Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan nitrat ve pestisit girdileri de, artan sıcaklıklar ve düzensiz yağış koşullarıyla birlikte daha geniş alanlara taşınmakta; bu durum hem yüzey hem de yeraltı sularında kirlilik riskini artırarak suyun içme ve sulama amaçlı kullanımını sınırlayan bir faktör hâline gelmektedir (Carpenter & ark., 1998).

İklim değişikliği hem uzun süreli kuraklıkların hem de ani taşkınların sıklığını artırmaktadır. Dünya genelinde son 20 yılda meteorolojik kuraklık olayları %30 artmış; aynı dönemde şiddetli taşkınların görülme sıklığı da yükselmiştir (Delpla & ark., 2009). Bu durum, su yönetimi sistemlerinin iki zıt uçtaki riskle aynı anda başa çıkmasını gerektirmektedir. Kuraklık dönemlerinde tarım ve içme suyu tedariki zorlaşırken, taşkınlar altyapıya zarar vererek suyun kullanılabilirliğini azaltmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, değişen iklim koşulları su kaynaklarını hem miktar hem kalite açısından baskı altına almakta, bu da gıda üretimi, ekosistem sağlığı ve toplumların yaşam kalitesi üzerinde çok yönlü tehditler oluşturmaktadır.

Su Kaynaklarındaki Değişimin Tarımsal Üretim ve Gıda Güvencesi Üzerine Etkisi

Su kaynaklarındaki değişimler, özellikle iklim değişikliği bağlamında değerlendirildiğinde, tarımsal üretim sistemleri ve buna bağlı olarak gıda güvencesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Tarım sektörü küresel ölçekte tatlı su kullanımının en büyük payını oluşturmakta; bu nedenle su miktarında, dağılımında ve kalitesinde meydana gelen değişimler, doğrudan tarımsal verimlilik kayıplarına

ve gıda arzının kırılganlaşmasına yol açmaktadır. Su kaynaklarının azalması yalnızca toplam su varlığını sınırlamakla kalmamakta, aynı zamanda üretim süreçlerinin sürekliliğini ve öngörülebilirliğini de zayıflatmaktadır (Ingrao & ark., 2023).

Küresel iklim değişikliği, yağış rejimlerinde gözlenen düzensizlikler, kuraklıkların şiddet ve süresindeki artış ile taşkın olaylarının daha sık yaşanması yoluyla hem yüzey hem de yeraltı su kaynaklarının mevcudiyetini etkilemektedir. Bu süreçler, suyun yıl içindeki dağılımını bozarak tarımsal üretim sistemlerini giderek daha kırılgan hâle getirmektedir. Özellikle yarı kurak ve suya bağımlı bölgelerde yüzey suları ve yeraltı sularında uzun dönemli azalma eğilimleri, tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini zorlaştıran temel etmenler arasında yer almaktadır (İslam., 2022).

Su kıtlığı, bitkisel üretim üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. Artan sıcaklıklarla birlikte evapotranspirasyon hızlarının yükselmesi, bitkilerin büyüme dönemlerinde daha sık ve daha şiddetli su stresiyle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, pek çok tarımsal üründe verim düşüşleriyle sonuçlanmakta ve yalnızca kurak bölgelerle sınırlı kalmayıp orta enlemlerde de belirgin biçimde hissedilmektedir. Yağışların düzensizleşmesi ve sulama suyu teminindeki belirsizlikler, tarımsal üretimin istikrarını zayıflatarak gıda arz güvenliğini küresel ölçekte tehdit eden bir boyut kazanmaktadır. Su kaynaklarındaki değişkenlik, üretim desenlerinin yeniden şekillenmesine de neden olmaktadır. Su kıtlığı koşullarında üreticiler, daha az su tüketen ürünlere yönelmek zorunda kalmakta; bu durum bazı temel tarımsal ürünlerin üretiminde daralmaya ve gıda çeşitliliğinde azalmaya yol açabilmektedir. Aynı zamanda hidrolojik dengesizlikler, sulama altyapısı sınırlı olan küçük ölçekli üreticileri orantısız biçimde etkilemekte ve bu durum gıda güvencesinde bölgesel eşitsizlikleri derinleştirmektedir (Artık & ark., 2024).

Su kaynaklarındaki değişimlerin gıda güvencesi üzerindeki etkisi yalnızca üretim miktarıyla sınırlı değildir; ekonomik boyut da bu süreçten doğrudan etkilenmektedir. Su teminindeki kısıtlar, sulama maliyetlerini artırmakta ve özellikle sulamaya bağımlı tarım sistemlerinde üretim giderlerinin yükselmesine neden olmaktadır. Artan maliyetler çiftçi gelirlerini baskılamakta, bu durum ise iklim kaynaklı kuraklık dönemlerinin ardından gıda fiyatlarında dalgalanmalara ve arz istikrarının bozulmasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla suya erişim, tarımsal üretim kadar gıdanın ekonomik erişilebilirliği açısından da kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Ingrao & ark., 2023).

Su kalitesindeki bozulmalar da tarımsal üretim ve gıda güvencesini etkileyen önemli bir diğer boyuttur. Düşük akım koşulları ve artan sıcaklıklar, su kaynaklarında kimyasal ve biyolojik kirleticilerin yoğunlaşmasına zemin hazırlamakta; bu durum sulama suyu kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Tarımsal alanlara taşınan nitrat, pestisit ve diğer kirleticiler, toprak ve ürün kalitesinde düşüşlere neden olarak uzun vadede tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde su kalitesindeki bozulmalar, gıda arzının güvenilirliği üzerinde belirgin riskler oluşturmaktadır (Jawahar & Ringler., 2009).

Bu bağlamda sürdürülebilir su yönetimi yaklaşımları, tarımsal üretim sistemlerinin iklim değişikliğine karşı dayanıklılığını artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Su kaynaklarının korunması, su verimliliğini artıran sulama tekniklerinin yaygınlaştırılması ve tarımsal üretimde su tasarrufuna dayalı uygulamaların benimsenmesi, suya bağlı risklerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak bu yaklaşımların etkin biçimde uygulanabilmesi, yalnızca teknik çözümlerle değil, aynı zamanda kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi ve uzun vadeli yatırımların hayata geçirilmesiyle mümkün olabilmektedir (Li.,2021).

Genel olarak değerlendirildiğinde, su kaynaklarındaki değişimler tarımsal üretim ve gıda güvencesini çok boyutlu bir biçimde etkilemektedir. Bu etki, üretim miktarlarının ötesinde, suya erişim, ürün çeşitliliği, ekonomik istikrar ve uzun vadeli gıda arz güvenliği üzerinde belirleyici sonuçlar doğurmaktadır. Dolayısıyla su kaynaklarının bütüncül ve sürdürülebilir bir yaklaşımla yönetilmesi, tarımsal üretimin devamlılığı ve gıda güvencesinin sağlanması açısından temel bir öncelik olarak ortaya çıkmaktadır.

İklim Değişikliği ve Sağlıklı Beslenme İlişkisi

İklim değişikliği, çevresel ve ekonomik etkilerinin ötesinde, toplumların beslenme yapısını ve sağlıklı gıdaya erişimini belirleyen temel unsurlardan biri hâline gelmiştir. Artan sıcaklıklar, aşırı hava olaylarının sıklığı, kuraklık koşullarının yaygınlaşması ve su kaynaklarındaki azalma; gıda üretimini, gıdanın çeşitliliğini ve besin içeriğini doğrudan etkilemektedir. Bu süreç, özellikle kırılgan gruplar açısından yeterli ve dengeli beslenmenin sürdürülmesini güçleştirmekte; beslenme güvencesi ile sağlık göstergeleri üzerinde baskı oluşturmaktadır (Smith & Myers., 2018; Springmann & ark., 2018).

İklim koşullarındaki değişimler, tarımsal üretimde yalnızca miktar kayıplarına değil, aynı zamanda ürünlerin besin bileşiminde meydana gelen değişimlere de yol açmaktadır. Artan sıcaklıklar ve su kısıtı altında yetiştirilen birçok tarım ürününde protein, vitamin ve mineral içeriklerinde azalmalar gözlenmektedir. Özellikle yükselen atmosferik karbondioksit düzeylerinin, temel besin öğeleri olan demir ve çinko gibi mikro besin elementlerinin bitkisel ürünlerdeki yoğunluğunu düşürdüğü; bunun da gizli açlık ve mikro besin yetersizliklerini derinleştirdiği ifade edilmektedir (Loladze., 2002; Myers & ark., 2014). Bu durum, beslenmenin niceliğinden çok niteliğinin önem kazandığı günümüz koşullarında, iklim

değişikliğinin halk sağlığı üzerindeki dolaylı etkilerini daha görünür kılmaktadır.

Gıda arzındaki düzensizlikler ve üretim kayıpları, fiyat artışlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, sağlıklı beslenmeye erişimi daha da sınırlamaktadır. İklim kaynaklı üretim dalgalanmaları, özellikle düşük gelirli hanelerde daha ucuz ancak besin değeri düşük gıdalara yönelimi artırmakta; bu da dengesiz beslenme ve yetersiz besin alımı riskini yükseltmektedir. Çocuklar, yaşlılar ve kronik hastalığı olan bireyler gibi hassas gruplar bu süreçten orantısız biçimde etkilenmekte; malnütrisyon, büyüme geriliği ve bağışıklık sisteminin zayıflaması gibi sonuçlar daha sık görülmektedir (Willett & ark., 2019).

Bu çerçevede, iklim değişikliği ile sağlıklı beslenme arasındaki ilişkinin yalnızca bir risk alanı değil, aynı zamanda bir müdahale fırsatı sunduğu da görülmektedir. Bitki ağırlıklı, mevsimsel ve yerel gıdalara dayalı beslenme biçimleri; hem çevresel baskıları azaltmakta hem de kronik hastalıkların önlenmesine katkı sağlamaktadır. Akdeniz tipi beslenme gibi sürdürülebilir diyet modelleri, daha düşük sera gazı salımı ve su kullanımıyla ilişkilendirilirken, aynı zamanda beslenme kalitesini artıran bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Springmann & ark., 2016; Clark & ark., 2019).

Sağlıklı beslenmenin iklim değişikliği koşullarında korunabilmesi, yalnızca bireysel tercihlere değil, aynı zamanda gıda sistemlerinin bütününe yönelik düzenlemelere bağlıdır. Tarımsal üretimden tüketime uzanan süreçte, iklim koşullarına uyumlu üretim yöntemlerinin yaygınlaştırılması, besin çeşitliliğinin korunması ve sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının desteklenmesi hem halk sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir (Willett & ark., 2019). Bu bütüncül yaklaşım, iklim değişikliği ile sağlıklı beslenme arasındaki karşılıklı

etkileşimin daha dengeli bir çerçevede yönetilmesine olanak sağlamaktadır.

Su Yönetimi ve Beslenmede Sürdürülebilirlik

Su kaynaklarındaki azalma, artan sıcaklıklar, yağış rejimlerindeki düzensizlikler ve ekstrem iklim olayları hem tarımsal üretim kapasitesini hem de toplumların sağlıklı beslenme olanaklarını tehdit eden küresel bir sorun hâline gelmiştir. Bu nedenle sürdürülebilir su yönetimi ve beslenme politikaları, iklim değişikliği bağlamında giderek daha stratejik bir önem kazanmaktadır (Gitz & ark., 2016). Su, besin üretiminin temel girdilerinden biri olduğundan, su yönetimindeki her değişim doğrudan gıda güvenliğini, besin çeşitliliğini ve toplum sağlığını etkilemektedir. Küresel ölçekte yapılan değerlendirmeler, su kısıtlarının arttığı bölgelerde beslenme kalitesinin düştüğünü ve tek tip gıdaya dayalı diyetlerin yaygınlaştığını göstermektedir (D’Odorico & ark., 2014; Kummu & ark., 2021).

Sürdürülebilir su politikalarının merkezinde, “entegre su kaynakları yönetimi” (IWRM) bulunmaktadır. Bu yaklaşım; tarım, sanayi ve hane halkı su kullanımını dengeli biçimde planlamayı ve ekosistemlerin su ihtiyaçlarını korumayı amaçlar (Gleick, 2014). Özellikle tarımsal sulama, toplam su tüketiminin %70’inden fazlasını oluşturduğu için; damla sulama, basınçlı sulama, yağmur suyu hasadı, toprak nemi izleme teknolojileri gibi yöntemlerle su kullanım verimliliğinin artırılması kritik bir önceliktir (Li, 2021). Sulama verimliliğinin artırılmasının yalnızca su tasarrufu sağlamadığı, aynı zamanda ürün verimini ve besin arzının sürekliliğini desteklediği çeşitli tarımsal modelleme çalışmalarında ortaya konmuştur. Tarımsal su verimliliği aynı zamanda besin arzını istikrara kavuşturarak gıda fiyatlarındaki dalgalanmaları azaltır. Bu, özellikle düşük gelirli ve su stresi yaşayan bölgelerde toplum sağlığı açısından önemli bir koruyucu etki yaratır (Rockström & ark., 2009).

Sürdürülebilir beslenme politikaları, sadece gıda üretim miktarını değil, aynı zamanda üretim sistemlerinin su ayak izi ve besin yoğunluğu ilişkisini de dikkate almalıdır. Bitkisel ürünlerin su ayak izinin hayvansal ürünlere göre çok daha düşük olduğu bilinmektedir (Mekonnen & Hoekstra, 2012). Bu nedenle birçok uluslararası strateji hem halk sağlığını hem çevresel sürdürülebilirliği desteklemek için bitki ağırlıklı beslenme diyetlerini teşvik etmektedir (Willett & ark., 2019). Bitki temelli beslenme yaklaşımlarının aynı zamanda kalp-damar hastalıkları ve bazı metabolik hastalıkların görülme sıklığını azalttığı, epidemiyolojik çalışmalarla desteklenmektedir (Clark & ark., 2019).

Ayrıca, iklim değişikliğine dayanıklı tohum çeşitlerinin, baklagillerin ve mikro-besin yoğunluğu yüksek ürünlerin desteklenmesi hem su tasarrufu sağlar hem de toplumun kaliteli besine erişimini artırır (Li, 2021). Bu politikalar uzun vadede obezite, yetersiz beslenme ve mineral-vitamin eksikliklerinin azaltılmasında tamamlayıcı bir rol oynar. Özellikle baklagillerin suya dayanıklılığı ve yüksek protein-mineral içeriği, bu ürünleri iklim değişikliği koşullarında stratejik gıdalar hâline getirmektedir (Gepts & ark., 2005; Willett & ark., 2019).

Sürdürülebilir su ve beslenme politikaları, geleceğin gıda ve sağlık güvenliğinin temelini oluşturmaktadır. Bu politikalar yalnızca suyun korunmasını değil, aynı zamanda beslenme kalitesinin artırılmasını, çevresel etkinin azaltılmasını ve toplum sağlığının geliştirilmesini hedeflemektedir. Etkin politikalar; bilimsel veriye dayalı planlama, uluslararası iş birliği, teknoloji yatırımları ve sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının teşviki ile mümkün olacaktır.

SONUÇ

İklim değişikliği, su kaynakları ve sağlıklı beslenme arasındaki ilişki, günümüzde yalnızca çevresel bir sorun olmaktan çıkmış; tarımsal üretim, gıda güvencesi ve toplum sağlığını

doğrudan etkileyen çok boyutlu bir sistem hâline gelmiştir. Bu bölümde ele alınan bulgular, iklim koşullarındaki değişimlerin su kaynaklarının miktarı, zamansal dağılımı ve kalitesi üzerinde yarattığı baskıların, tarımsal üretim süreçlerini ve dolayısıyla gıda arzını giderek daha kırılgan hâle getirdiğini ortaya koymaktadır. Suya bağımlı üretim sistemlerinin iklim değişikliğine karşı duyarlılığı, gıda sistemlerinin sürdürülebilirliğini tehdit eden temel unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Su kaynaklarındaki azalma ve belirsizlikler, tarımsal verimliliğin yanı sıra ürün çeşitliliği ve besin değerleri üzerinde de belirleyici olmaktadır. Artan sıcaklıklar ve su stresi, bitkisel üretimde verim kayıplarına yol açarken; bazı temel gıda ürünlerinde protein, mineral ve mikro besin içeriklerinde düşüşler gözlenmektedir. Bu durum, özellikle düşük gelirli ve kırılgan nüfus gruplarında yetersiz ve dengesiz beslenme risklerini artırmakta, gıda güvencesi ile halk sağlığı arasındaki bağı daha da görünür kılmaktadır. Dolayısıyla iklim değişikliğinin etkileri, yalnızca üretim miktarlarıyla sınırlı kalmayıp, gıdanın besleyici niteliği ve erişilebilirliği üzerinden beslenme kalitesini de etkilemektedir.

Beslenme alışkanlıkları ile iklim değişikliği arasındaki karşılıklı etkileşim de bu çerçevede önem kazanmaktadır. Gıda sistemlerinin çevresel ayak izi, özellikle su kullanımı açısından değerlendirildiğinde, beslenme tercihlerinin hem doğal kaynaklar hem de sağlık çıktıları üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir. Bitki ağırlıklı, mevsimsel ve yerel beslenme yaklaşımları; daha düşük su ve çevresel yük oluştururken, kronik hastalık risklerinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle sağlıklı beslenme, yalnızca bireysel bir sağlık tercihi değil, aynı zamanda iklim değişikliğine uyum ve kaynakların korunması açısından işlevsel bir araç olarak değerlendirilebilir.

Sürdürülebilir su yönetimi ve beslenme politikalarının bütüncül biçimde ele alınması, etkili çözümler geliştirilmesi

açısından önem taşımaktadır. Tarımsal sulamada su verimliliğini artıran uygulamalar, iklim koşullarına uyumlu ürün desenleri ve besin değeri yüksek ürünlerin desteklenmesi hem su kaynaklarının korunmasına hem de gıda güvencesinin güçlendirilmesine katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, iklim değişikliği bağlamında su kaynakları ve sağlıklı beslenme arasındaki ilişki, disiplinler arası ve uzun vadeli bir bakış açısı gerektirmektedir. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, tarımsal üretimin iklim koşullarına uyumlu hâle getirilmesi ve sağlıklı beslenme yaklaşımlarının yaygınlaştırılması; yalnızca çevresel sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda gıda güvencesi ve toplum sağlığının korunması açısından da temel önceliklerdir. Bu bütüncül yaklaşım, gelecekte artması beklenen iklim baskıları karşısında daha dirençli gıda sistemlerinin oluşturulmasına ve sağlıklı toplumların desteklenmesine katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

Artık, N., Güçer, Y., & Poyrazoğlu, E. S. (2024). Impact of climate change on agricultural production and food security. *Akademik Gıda, Yeşil Dönüşüm Özel Sayısı*, 45–50.

Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568.

Clark, M. A., Springmann, M., Hill, J., & Tilman, D. (2019). Multiple health and environmental impacts of foods. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(46), 23357–23362. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906908116>

Delpla, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., & Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, 35(8), 1225–1233.

D’Odorico, P., Carr, J. A., Laio, F., Ridolfi, L., & Vandoni, S. (2014). Feeding humanity through global food trade. *Earth’s Future*, 2(9), 458–469.

Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., ... & Scanlon, B. R. (2012). Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, 59, 143–156.

Gepts, P., Beavis, W. D., Brummer, E. C., Shoemaker, R. C., Stalker, H. T., Weeden, N. F., & Young, N. D. (2005). Legumes as a model plant family. *Genomics for Food and Feed: Report of the Cross-Legume Advances through Genomics Conference*.

Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C. D., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: Risks and responses. *FAO Report*, 110(2), 3–36.

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & Van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>

Gleick, P. H. (2014). Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Weather, Climate, and Society*, 6(3), 331–340.

Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., ... & Wisser, D. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251–3256.

Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(9), 3232–3237.

Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisinigh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*, 9(8), e18667.

Islam, M. (2022). Impacts of climate change on water resources, agricultural production and food security: Evidence from Türkiye. *Journal of Economy Culture and Society*, 66, 163–179.

Jawahar, P., & Ringler, C. (2009). Water quality and food safety: A review and discussion of risks. *Water Policy*, 11(6), 680–695. <https://doi.org/10.2166/wp.2009.086>

Kummu, M., Heino, M., Taka, M., Varis, O., & Viviroli, D. (2021). Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space. *One Earth*, 4(5), 720–729. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.017>

Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Park, Y. (2023). IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policymakers. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

Li, L. (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): Systems at breaking point*.

Lipp, E. K., Huq, A., & Colwell, R. R. (2002). Effects of global climate on infectious disease: The cholera model. *Clinical Microbiology Reviews*, 15(4), 757–770.

Loladze, I. (2002). Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: Toward globally imbalanced plant stoichiometry. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(10), 457–461.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>

Myers, S. S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D., Bloom, A. J., ... & Usui, Y. (2014). Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139–142.

Myers, S. S., Smith, M. R., Guth, S., Golden, C. D., Vaitla, B., Mueller, N. D., ... & Huybers, P. (2017). Climate change and global food systems: potential impacts on food security and undernutrition. *Annual review of public health*, 38(1), 259–277.

O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., & Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful algae*, 14, 313–334. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.027>

Paerl, H. W., & Huisman, J. (2009). Climate change: A catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 1(1), 27–37.

Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651-659.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263), 472-475.
<https://doi.org/10.1038/461472a>

Rose, J. B., Epstein, P. R., Lipp, E. K., Sherman, B. H., Bernard, S. M., & Patz, J. A. (2001). Climate variability and change in the United States: potential impacts on water-and foodborne diseases caused by microbiologic agents. *Environmental health perspectives*, 109(Suppl 2), 211.

Smith, M. R., & Myers, S. S. (2018). Impact of anthropogenic CO₂ emissions on global human nutrition. *Nature Climate Change*, 8(9), 834–839.

Springmann, M., Godfray, H. C. J., Rayner, M., & Scarborough, P. (2016). Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4146–4151.

Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., ... & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519-525.

Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515, 518–522.

Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123–138.

Wada, Y., Van Beek, L. P., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W., Vasak, S., & Bierkens, M. F. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical research letters*, 37(20).

Wheeler, T., & von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508–513.
<https://doi.org/10.1126/science.1239402>

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., ... & Murray, C. J. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The lancet*, 393(10170), 447-492.

BÖLÜM 7

MICROBIAL PROTEINS (SINGLE CELL PROTEINS)

Pınar SEKERCİ KELES¹

Introduction

The rapid growth of the world population and the limitation of agricultural resources pose a serious threat to meeting humanity's increasing food demand. This situation has made the need for alternative and sustainable protein sources increasingly evident. Microbial proteins, derived from bacteria, yeasts, fungi, and microalgae, have emerged as high-nutritional-value protein sources. Considered an alternative to traditional animal proteins, these biotechnological products offer significant economic and ecological advantages due to their environmentally friendly production processes and low water and energy requirements. In low-income countries, providing healthy and balanced nutrition for the growing population is becoming increasingly difficult; therefore, new sources for meeting protein needs are gaining attention. In this context, bacteria, yeasts, fungi, and microalgae represent important potential sources of protein that can be utilized in human and animal nutrition.

¹ Assistant Professor; Ardahan University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering. ORCID No <https://orcid.org/0000-0002-6225-4781>

By products generated during the processing of agricultural products such as orange peels, sugarcane bagasse, potatoes, coconuts, grapes, and mangoes serve as potential substrates for microbial production. Moreover, industrial wastes from alcohol, paper, and petroleum industries can also be utilized in microbial production processes. In this way, both agricultural and industrial wastes can be valorized, preventing environmental pollution, creating economic value, and enabling the production of high-quality proteins comparable to those from animal sources. Regardless of their origin, these microbial proteins can be dried and processed, allowing their use in specific proportions in human food or animal feed (Demirel and Demirel 2018).

Thanks to their high nutritional value, microbial proteins have become particularly significant as alternative protein sources in poultry nutrition. They offer a sustainable solution to replace conventional sources such as soybean meal and fishmeal, which have limited production potential. When optimal culture conditions are maintained, microbial protein production can be achieved in a much shorter time compared to plant and animal protein production. To ensure economic feasibility, it is crucial to use low-cost and waste-derived substrates in the culture medium. In this regard, carbohydrate sources containing cellulose and hemicellulose are considered ideal substrates for microbial protein production (Ghughuskar & Project, 2024). Today, single cell protein (SCP) has a wide range of applications and plays an important role in both animal feed and the food industry. In animal nutrition, it is used in calf rearing, poultry, swine, fish farming, and pet food formulations.

In the food industry, it serves as a flavor enhancer, vitamin carrier, emulsifier, and nutritional supplement in soups, ready-to-eat meals, and similar products. Moreover, SCP is also utilized in industrial applications such as paper processing, leather treatment, and as a foam stabilizer (Malav & Dube, 2017).

Single Cell Protein (SCP)

Single cell protein (SCP) refers to a biomass composed of dried microbial cells. The term is also known as bioprotein, microbial protein, or biomass protein. Owing to its high crude protein content (60–70%), amino acid profile comparable to that of animal proteins, richness in B-group vitamins, and low fat content, SCP represents an important potential alternative nutritional source for both human and animal diets (Poel et al., 2013; Suman et al., 2015). When examining the amino acid profiles of SCPs, it has been determined that they are rich in essential amino acids such as lysine and methionine, which are often present in limited amounts in most animal and plant protein sources (Çelik, 2020). Moreover, research has shown that SCP can effectively substitute common protein sources such as fish meal and soybean meal (Kurbanoğlu & Kurbanoğlu, 2001). Enhancing available protein sources has become one of the main focal points of modern technological development. Microbiological protein synthesis offers a sustainable production method that allows for much more efficient use of resources such as water, land, and energy compared to traditional meat production, and it operates independently of climatic and environmental conditions. From a food safety perspective, microbial protein production also contributes to controlling chemical and biological hazards such as hormones, pesticides, and pathogens (Volova & Barashkov, 2010). Research on obtaining proteins—essential nutrients for both humans and animals—from more sustainable sources compared to conventional methods has been ongoing for many years (Suman et al., 2015). Microorganisms have been an indispensable part of human nutrition for millennia, playing key roles in the production of yogurt, cheese, kefir, bread, fermented vegetables, and fermented fish pastes (Rasoul-Amini et al., 2009). The use of yeasts in bread and beverage production dates back to ancient civilizations. Furthermore, yeasts were among the first microorganisms

recognized, about a century ago, as important feed additives for animal nutrition (Demirel & Demirel, 2018).

In the 1960s, initial studies were conducted on the direct use of bacterial biomass as a source of protein, fat, and vitamins, during which the concept of “single cell protein (SCP)” was introduced into scientific literature. Since a large portion of the microbial dry matter consists of protein, these organisms possess a remarkably high protein content even at the single-cell level (Erdoğan et al., 2022). Under suitable nutrient media and optimal cultivation conditions, protein production can be achieved much faster than that derived from plant or animal sources. Moreover, the use of food industry by-products and wastes as substrates provides a significant economic advantage by reducing production costs. Because SCP production is carried out in closed fermentation systems, the process is not affected by seasonal conditions, allowing year-round production at high efficiency and in desired quantities (Pikaar et al., 2017). While there is no risk of transmission of animal-borne diseases during SCP production, there remains a high possibility of microbial contamination. Therefore, it is crucial to maintain aseptic conditions throughout fermentation. To prevent contamination between the fermenter and the external environment, sterile air filters are installed at the air inlet and outlet points of the bioreactor. Another preventive measure involves complete sterilization of the bioreactor before fermentation begins. Subsequently, in batch or continuous systems, the sterilized nutrient medium is transferred into the fermentation vessel under sterile conditions, and appropriate parameters are set for microbial growth. Additionally, all pipelines carrying air, inoculum (starter culture), and nutrients are sterilized with steam. To further minimize the risk of contamination, bioreactor connections are designed to withstand steam sterilization, and the system is equipped to allow aseptic inoculation, sampling, and product separation (Erdoğan et al., 2022).

A wide variety of microorganisms can be used in SCP production. Among these, bacteria are particularly important sources of SCP. Bacteria have very short generation times and can double their population in 20 to 120 minutes, depending on the species. In addition, these bacteria are capable of utilizing not only organic wastes such as starch and sugars but also ethanol, methanol, and nitrogen-containing petrochemical wastes as substrates. Due to this versatility, they can thrive on a wide range of substrates (Erdoğan et al., 2022). The amino acid profile of bacterial SCP closely resembles that of fish protein, making it a protein source of high biological value (Khan Yousufi, 2012). Furthermore, the average nutrient composition of different groups of microorganisms on a dry-weight basis (%) is summarized in Table 1. Examination of the table indicates that bacteria stand out due to their high protein content, whereas algae possess a richer lipid composition. Although the nutrient profiles of microorganisms used in SCP production vary depending on their species and metabolic characteristics, bacterial SCPs, in particular, have been reported to show amino acid compositions similar to fish protein (Nasseri et al., 2011).

Table 1. Average nutritional values of microorganisms used in THP production

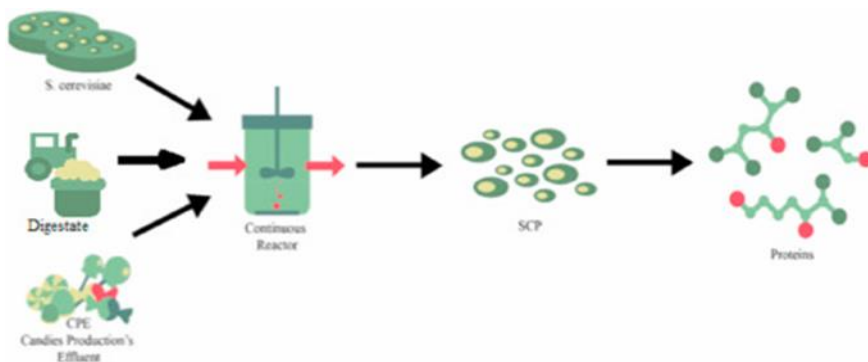
Microorganism Group	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Nucleic Acid (%)
Fungi (Molds)	30–45	2–6	9–14	7–10
Algae	40–60	7–20	8–10	3–8
Yeasts	45–55	4–8	5–10	6–12
Bacteria	60–80	2–7	5–10	8–12

One of the important sources used in single cell protein (SCP) production is filamentous fungi (molds). The proteins obtained from these organisms are known as mycoproteins, typically containing 30–50% protein. Mycoproteins have been approved for human consumption and are classified as Generally Recognized As Safe

(GRAS) food ingredients. Furthermore, their amino acid profiles meet the nutritional standards established by the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. (Nasseri et al., 2011). In recent years, mycoproteins have attracted considerable attention as a sustainable and high-quality protein alternative, particularly among individuals who prefer vegan diets. Although mycoproteins can be produced from various fungal species, genera such as *Agaricus bisporus*, *Auricularia fuscusuccinea*, *Neurospora intermedia*, and *Pleurotus albidus* have been utilized for this purpose. However, the most widely used and commercially significant species in mycoprotein production is *Fusarium venenatum*, a filamentous fungus that is currently employed on an industrial scale for the production of mycoprotein-based food products (Stoffel et al., 2021). Single cell proteins (SCP) derived from certain microalgal species can be produced for use in both animal and human nutrition. These microalgae-based SCPs typically contain up to 70% protein, making them remarkable for their high nutritional value. In addition to their protein composition, they are also rich in omega-3 fatty acids, thereby offering a health-promoting lipid profile and serving as a valuable microbial oil source. Moreover, the nucleic acid content of microalgae generally ranges between 3% and 8%, which is comparatively lower than that of other microorganisms (Gouveia et al., 2009). Historically, microalgae of the *Spirulina* genus were harvested and dried by indigenous communities living around Lake Texcoco in Mexico, where they have been consumed for centuries as a dietary protein source. Similarly, the biomass of other microalgal genera such as *Chlorella* and *Scenedesmus* has been utilized in various regions as a component of animal feed. The high protein content, rapid growth rate, and simple cultivation requirements of these algae have facilitated their global recognition as valuable feed additives and sustainable protein sources (Raja et al., 2008).

It is estimated that the annual global production of all microalgal species is approximately 10,000 tons. More than 75% of the produced algal biomass is utilized in the manufacture of commercial products such as powders, tablets, capsules, and lozenges (Erdoğan et al., 2022). The production process of single cell protein (SCP) begins with the preparation of a culture medium containing an appropriate carbon source suitable for the selected microorganism. Following this stage, optimal conditions of temperature, pH, and oxygen are maintained in the bioreactor to ensure the efficient growth of microorganisms. Once the desired microbial growth is achieved, the resulting biomass is harvested from the fermentation medium. The harvested biomass is then subjected to a series of downstream processing steps, including washing, cell disruption, protein extraction, and purification (Nasseri et al., 2011). Thus, high-purity single cell protein (SCP) is obtained. The main stages of the SCP production process are illustrated schematically in Figure 1 (Erdoğan et al., 2022).

Figure 1. Schematic representation of the single cell protein (SCP) production process



Autotrophic microorganisms play a critical role in the global carbon and nutrient cycles. These microorganisms utilize inorganic carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere in biological and chemical reactions to synthesize organic biomass. During this process, they

also recycle essential elements such as nitrogen (N) and phosphorus (P), thereby contributing to material cycling within ecosystems. In doing so, they facilitate the production of organic compounds necessary for the nutrition of higher life forms (Elser et al., 2000). Algae and autotrophic bacteria are alternative protein sources that can be utilized in the form of single cell protein (SCP) for both animal feed and human food applications (Walsh et al., 2015). These microorganisms are rich not only in protein but also in prebiotic compounds, and they are capable of accumulating significant amounts of prebiotic material within their cellular structure. (Matassa et al., 2016).

Microbial Protein (SCP) Production

Large-scale production of Single Cell Protein (SCP) is a complex biotechnological process that demands a multidisciplinary approach. This field is closely related to several scientific disciplines, including biotechnology, microbiology, biochemistry, genetics, chemistry, food engineering, agricultural and processing technologies, animal nutrition, ecology, toxicology, pharmaceutical sciences, and veterinary medicine. Each of these disciplines contributes critically at different stages of the production process. For instance, microbiology and biotechnology focus on the selection and improvement of microorganisms, while biochemistry and genetics address metabolic regulation and cellular protein synthesis. Food and agricultural engineering play key roles in optimizing the growth environment and controlling the production process, whereas toxicology and veterinary sciences are essential for evaluating product safety and biocompatibility. The production process also requires extensive engineering knowledge and practical expertise. In particular, maintaining homogeneity of the culture medium through continuous mixing during fermentation is vital for achieving efficient microbial growth and uniform product quality. In general, SCP production begins with the preparation of a nutrient medium

that contains an appropriate carbon source for the selected microorganism. Throughout the process, strict aseptic conditions must be maintained to prevent contamination. Once the microorganisms have completed their growth phase, the biomass is separated from the fermentation medium and collected for further processing (Nasseri et al., 2011). During this process, the nutrient composition, temperature, pH, and oxygen levels required for microbial growth are carefully controlled. Single Cell Protein (SCP) can be produced using two main fermentation methods: the submerged fermentation technique, which is carried out entirely in a liquid medium, and the semi-solid fermentation technique, which is performed in a semi-solid environment. (Demirel & Demirel, 2018). In the submerged fermentation method, all the nutrients required for microbial growth are provided in a liquid medium. The substrate is continuously maintained within the fermenter, and product harvesting is carried out continuously. The resulting product is subsequently subjected to filtration, centrifugation, and drying processes. In contrast, the semi-solid fermentation method requires less precise substrate preparation and allows the use of relatively firm materials such as tapioca residues. However, the protein yield obtained through this method is generally lower. Moreover, submerged fermentation is a more costly production process compared to the semi-solid method. In both methods, the growth medium must contain an appropriate carbon source. These carbon sources may include n-alkanes, gaseous hydrocarbons, methanol, ethanol, or renewable materials such as molasses, dairy industry wastes, polysaccharides, brewery residues, grain distillation by-products, and sugarcane bagasse. In addition, mineral salts such as potassium (K), manganese (Mn), zinc (Zn), and iron (Fe), as well as ammonia gas, can be added to the culture medium as essential nutritional components to support microbial growth (Nasseri et al., 2011). In SCP production, the aeration process plays a crucial role. During fermentation, the metabolic activities of microorganisms

generate heat, which must be removed from the system through an appropriate cooling mechanism. This is essential both for maintaining optimal growth conditions for the microorganisms and for improving overall production efficiency. The biomass produced by unicellular microorganisms such as yeasts and bacteria is typically recovered by centrifugation, whereas biomass derived from filamentous fungi is separated through filtration. All these operations must be carried out under hygienic and aseptic conditions to ensure microbiological safety of the final product. Following production, the obtained biomass is thoroughly washed with water and then subjected to a drying process. These steps are critical for enhancing product quality and extending shelf life (Demirel & Demirel, 2018). In SCP production, the culture media commonly used typically contain mono- and disaccharides. While most microorganisms can easily metabolize glucose, certain species are also capable of efficiently utilizing hexose and pentose sugars as well as disaccharides. The fermenter is a type of reactor system in which dense biomass derived from plant or animal cells is fermented. Fermenters can be designed in various scales — from small laboratory units holding only a few liters to large industrial systems with capacities of several hundred liters. Bioreactors, on the other hand, are designed to contain a high concentration of live microorganisms. Both systems are equipped with aeration and agitation mechanisms, and are supported by control devices such as pH meters, thermostats, and sensors to maintain stable fermentation conditions. For cost-effective production, materials in liquid form with a dry matter content below 5% must undergo pretreatment processes such as filtration, sedimentation, centrifugation, or membrane separation before use. Furthermore, to ensure long-term preservation and prevent spoilage of the produced SCP, the moisture content of the final product must be reduced to below 10% (Nasseri et al., 2011).

General Characteristics Of Microorganisms Used In Single Cell Protein (SCP) Production

Microorganisms selected for Single Cell Protein (SCP) production must possess certain common characteristics to ensure efficient and safe production. These microorganisms should have low nutrient requirements, the ability to convert low-value waste materials into useful bioproducts, and exhibit rapid growth with high biomass yield. In addition, they are expected to maintain genetic and physiological stability during proliferation, be non-pathogenic, tolerant to temperature and pH variations, and have a low nucleic acid content. Other desirable properties include suitability for genetic modification, non-toxicity, and high digestibility, all of which are important criteria in the selection of microorganisms for SCP production. However, it has been reported that these microorganisms are generally deficient in sulfur-containing amino acids, such as methionine and cysteine. The nutritional value of SCP may vary depending on the type of microorganism used, while harvesting, drying, and processing methods also have a significant influence on the nutritional quality of the final product. (Demirel & Demirel, 2018).

Yeasts

Yeasts have been widely used for many years in the production of dairy products, alcoholic beverages, bakery goods, and various other foods. During World War I, the first studies on Single Cell Protein (SCP) production were initiated using *Torula* yeast (*Candida utilis*), marking an important milestone in microbial protein research. Today, microbial biomass derived from yeasts is commonly utilized as a protein source and flavor-enhancing ingredient in pet foods, including those for cats, dogs, and fish. In human nutrition, yeast-based SCP is increasingly preferred as an alternative protein source, particularly in vegetarian and vegan diets. (Demirel & Demirel,

2018). Compared to other single-cell sources, yeasts possess several distinct advantages. Firstly, their long-standing use in the fermentation industry contributes to their high level of safety and reliability. In addition, their ability to grow in acidic environments, their larger cell size—which facilitates easier harvesting compared to bacteria—and their high lysine and malic acid content are notable advantages.

However, yeasts also have certain disadvantages. They exhibit a slower growth rate and a lower protein content (approximately 45–65%) compared to bacterial sources. Furthermore, their thick and complex cell walls, composed mainly of mannoproteins, can hinder digestibility, thereby reducing their palatability and nutritional accessibility for both humans and animals (Balo & Amente, 2023). In addition, yeast cultures are generally deficient in sulfur-containing amino acids, particularly methionine. Therefore, their use as a complete protein source is limited, and they are typically recommended to be combined with other protein sources to achieve a more balanced amino acid profile (Oliva-Teles & Gonçalves, 2001).

Algae (Microalgae)

Microalgae such as *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Coelastrum*, and *Spirulina* are cultivated as biomass and utilized for various purposes. Among these, the most commonly produced species are the unicellular green alga *Chlorella* and the filamentous blue-green alga *Spirulina*, whose production has increased rapidly in recent years. It is reported that the annual global production of microalgae exceeds 10,000 tons. The main advantages of algae include their ease of cultivation, efficient utilization of solar energy, high growth rate, and high protein content. In particular, during *Spirulina* cultivation, the high rate of carbon utilization eliminates the need for additional aeration systems to remove excess CO₂ from the medium, unlike

other algal species. Proteins obtained from algae possess a high biological value, comparable to that of certain plant-based protein sources. However, several factors limit their large-scale utilization, including technical challenges in production, high production costs, undesirable taste and odor, and the potential for heavy metal accumulation. Despite these limitations, algal proteins continue to be valued as important sources of nutrition and bioactive compounds, particularly in the cosmetic industry, health-promoting food products, and animal feed formulations. (Becker, 2007).

Filamentous Fungi (Molds)

The first scientific initiatives related to the concept of Single Cell Protein (SCP) date back to the Second World War. During this period, the food shortages caused by wartime conditions stimulated interest in alternative protein sources, leading to early research on utilizing fungal species such as *Fusarium* and *Rhizopus* that could grow in fermentation media as potential protein sources. However, the systematic investigation of fungi as a promising raw material for SCP production is a relatively recent development. The first comprehensive studies in this field were conducted in 1973, after which intensive research efforts focused on the nutritional value, production efficiency, and safety of fungal-derived single cell proteins. Numerous filamentous fungal species have been cultivated in glucose- and starch-containing media, and the resulting biomass has been referred to as mycoprotein. Approximately 3,000 fungal species have been evaluated in terms of growth performance and food safety; among them, non-toxic species such as *Aspergillus oryzae* and *Rhizopus arrhizus* were identified as suitable candidates for safe mycoprotein production. Saprophytic fungi, in particular, have the ability to convert complex organic materials into simpler compounds, thereby producing large amounts of fungal biomass. The yield of mycelial biomass varies depending on both the species used and the composition of the culture medium. Nevertheless,

certain fungal strains such as *Aspergillus niger*, *A. fumigatus*, and *Fusarium graminearum* pose serious toxicological risks to humans due to their potential to produce mycotoxins. Therefore, food safety and toxicological assessments are of critical importance when selecting microorganisms for SCP production. Although the harvesting process for filamentous fungi is relatively easy, their growth rates and protein contents are generally lower compared to other microbial sources. Moreover, the weak flavor and aroma characteristics of mycoproteins obtained from these fungi represent another drawback that may reduce consumer acceptability (Srividya et al., 2013).

Bacteria

Various bacterial strains can be employed in the production of Single Cell Protein (SCP). These bacteria possess significant potential due to their rapid growth rate, high protein synthesis capacity, and ability to utilize suitable substrates efficiently. Among them, *Methylophilus methylotrophus* is a particularly noteworthy microorganism. With a short generation time of approximately two hours, this species enables high-efficiency biomass production. Moreover, its ability to use single-carbon compounds such as methanol as a carbon source provides an economical and sustainable production alternative. The amino acid profile of bacterial proteins is generally more balanced than that of yeasts and fungi, making bacteria particularly advantageous for large-scale SCP applications in animal feed production. The main advantages of bacteria include rapid growth and reproduction, broad substrate utilization capacity, and the ability to grow on petrochemical substrates such as methane, petroleum fractions, ethanol, and methanol. Additionally, bacteria can effectively utilize nitrogen sources including ammonium salts, ammonia, urea, nitrates, and organic nitrogen compounds present in various industrial wastes. To ensure optimal growth conditions, the culture medium must be supplemented with essential trace minerals.

However, bacteria also present certain limitations. Due to their small cell size and low density, the separation of bacterial biomass from the culture medium is technically challenging and cost-intensive. Furthermore, their high nucleic acid content restricts the direct use of bacterial SCP in food products. The extraction and enzymatic degradation methods applied to reduce nucleic acid levels consequently increase production costs. Bacterial SCP typically contains more than 80% protein with high biological value, yet it remains deficient in sulfur-containing amino acids such as methionine and cysteine. The high nucleic acid and RNA content of bacterial SCP is another critical limiting factor that must be considered in its practical applications. (Demirel & Demirel, 2018). The common perception in society that bacteria are primarily harmful and disease-causing microorganisms also represents a significant psychological barrier to the acceptance of bacterial SCP for human consumption.

Advantages of Single Cell Proteins (SCP)

Microorganisms are living organisms with exceptionally high reproduction rates. For example, microalgae can divide every 2–6 hours, yeasts every 1–3 hours, and bacteria every 0.5–2 hours. Due to this rapid proliferation capability, large amounts of biomass can be produced within a short period. Moreover, microorganisms can be genetically modified with relative ease to achieve desired amino acid profiles. Their dry biomass typically contains 43–85% protein, depending on the species and cultivation conditions. Microorganisms can utilize waste-derived carbon sources as raw materials, thereby enabling low-cost protein production while simultaneously contributing to environmental pollution reduction. The production of microbial biomass is independent of seasonal or climatic variations, allowing for year-round, sustainable, and consistent-quality production. In addition, the land requirement for microbial cultivation is minimal, and productivity can be enhanced

through optimization of physical and nutritional parameters. In particular, microalgal cultures can be grown in non-arable or unused areas, thus avoiding competition with agricultural land. This approach provides a distinct economic advantage, especially for developing countries, as low-value by-products and industrial wastes can be valorized to produce affordable protein while also contributing to economic development. Compared to conventional protein production methods, SCP production is highly efficient. It is estimated that a fermentation area of approximately 0.8 km² could meet around 10% of the global protein demand. Many microorganisms can utilize economical and readily available substrates to generate the energy required for growth and reproduction. These include waste materials from the food, paper, and chemical industries; methane, molasses, alcohol, starch, and cellulose-containing sources (such as sawdust, corn cobs, and crop residues); and animal wastes. This capability is of great importance for reducing production costs and enhancing sustainability in Single Cell Protein (SCP) production. Through these means, low-cost protein production is achieved while also promoting the bioconversion of environmental waste materials. Additionally, in illuminated culture ponds, minerals can be added to the nutrient medium to produce proteins from photosynthetic algae. Although natural protein production processes are costly, single-cell microorganisms represent an important and sustainable alternative protein source for ensuring healthy and balanced nutrition in the context of the growing global population (Nasseri et al., 2011).

Protein production through conventional animal farming requires extensive pasturelands and large-scale forage crop cultivation areas. This production system is economically costly due to its high land requirements and long production cycles, and it often necessitates the intensive use of nitrogen-based fertilizers to enhance productivity. As a result, production costs increase while

environmental pollution and ecosystem imbalances emerge as a consequence of excessive fertilizer application. Over-fertilization not only leads to economic losses but also causes serious environmental problems, such as soil and water contamination. In contrast, Single Cell Proteins (SCP) are gaining increasing importance owing to their ability to be produced in limited spaces, coupled with their high yield and sustainability potential. If the current rate of global population growth continues, the incorporation of SCP into both human and animal nutrition will become an inevitable necessity for ensuring future food security. (Demirel & Demirel, 2018).

A wide variety of substrates can be used as carbon and energy sources in Single Cell Protein (SCP) production. To achieve high yield, these raw materials are generally hydrolyzed prior to use through physical, chemical, or enzymatic methods (Kurbanoğlu & Kurbanoğlu, 2001). During the production process, various materials such as hydrocarbons, nitrogenous compounds, polysaccharides, hemicellulose, and cellulose-based agricultural wastes, as well as animal-derived fibrous proteins including feathers, horns, hooves, and hair, can be utilized as suitable culture substrates. In addition, methane, alkanes, ethanol, and methanol, which are organic compounds containing nitrogen, can also serve as nutrient media in Single Cell Protein (SCP) production. Through the use of genetically engineered microorganisms, it is now possible not only to produce proteins, but also a range of value-added metabolites such as organic acids and lipids. SCP production can significantly enhance the nutritional value of low-quality, carbohydrate-rich raw materials, increasing their crude protein content by up to four to five times. When compared on a production basis, the efficiency of microbial protein synthesis is remarkable: a cow weighing approximately 0.5 tons can produce only about 0.5 kg of protein per day, whereas the same amount of soybean can yield around 40 kg of protein, and

yeasts are capable of producing protein equivalent to nearly 100 times their own biomass within a single day (Demirel & Demirel, 2018).

Disadvantages (Limitations) of Single Cell Proteins (SCP)

In Single Cell Protein (SCP) production, many of the microorganisms used may produce metabolites that are toxic to humans and animals. Therefore, it is of utmost importance to ensure that the obtained microbial biomass is free from toxic compounds. Biomasses with a high nucleic acid content are generally considered unsuitable for human consumption. In particular, bacterial SCPs tend to contain higher levels of nucleic acids compared to products derived from other microorganisms. This can lead to excessive purine intake, resulting in elevated uric acid levels in the body as a consequence of purine metabolism. Accumulation of uric acid in the bloodstream increases the risk of developing gout and kidney stone formation. Furthermore, the use of SCP products with high nucleic acid content or insufficient purification in foods may cause indigestion, gastrointestinal disorders, and allergic skin reactions. For this reason, the careful selection of microorganisms, preference for non-toxin-producing strains, and implementation of purification, heat treatment, or enzymatic degradation processes are critical for ensuring product safety. Toxins present in the production environment can pose serious health risks to both humans and animals. Consequently, SCP production processes that require strict sterility must be carried out under high standards of hygiene and sterilization, which in turn significantly increase production costs (Demirel & Demirel, 2018).

In addition, the indigestibility of the cell walls of certain microorganisms, such as yeasts and algae, can lead to the formation of undesirable taste and odor in the final product. For the safe consumption of SCP-derived products, viable cells must be

inactivated prior to ingestion. Otherwise, adverse effects such as allergic reactions on the skin or within the gastrointestinal tract, as well as nausea and vomiting, may occur. From a nutritional standpoint, although single cell proteins are richer in lysine and methionine than most cereals, the levels of these amino acids may still be insufficient to meet optimal dietary requirements. While such deficiencies can potentially be addressed through the use of genetically modified microorganisms, this approach raises new biosafety and ethical concerns regarding their application in food production. (Srividya et al., 2013). Moreover, algal species other than *Spirulina* are generally unsuitable for direct human consumption due to their high chlorophyll content. In addition, their tendency to become contaminated even at very low concentrations ($1\text{--}2\text{ mg L}^{-1}$) during the production process represents a significant limiting factor in terms of food safety (Balo & Amente, 2023).

Conclusion

Due to economic, political, social, and technical factors, Single Cell Proteins (SCP) have not yet achieved the expected level of importance in human and animal nutrition in developed countries. This is primarily because these nations, with their high purchasing power, have easy access to sufficient and high-quality food sources. In contrast, in developing countries, particularly in tropical and arid regions, populations often rely on high-carbohydrate and low-protein diets, leading to protein deficiencies and related nutritional disorders. In such regions, the use of Single Cell Proteins as part of the diet represents an important alternative for improving both human and animal health. SCP sources are considered promising for enhancing nutritional quality by supporting a balanced and adequate protein intake. Furthermore, in situations where traditional protein sources such as soybean meal and fish meal are either insufficient or economically unfeasible, SCPs will continue to serve as a sustainable, cost-effective, and environmentally friendly alternative.

References

- Balo, Y., & Amente, G. (2023). Scp K. 15, 1–9. <https://doi.org/10.25081/jebt.2023.v15.8677>
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>
- Çelik, B., & Üniversitesi Ziraat Fakültesi Zootečni Bölümü, A. (2020). Tek Hücre Proteinlerinin Hayvan Besleme Açısından Önemi ve Rasyonda Kullanım Olanakları. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 59(Ek Sayı), 113–116. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/lahaed/issue/54750/582490>
- Demirel, R., & Demirel, D. Ş. (2018). Single Cell Proteins for Human and Animal Nutrition. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(3), 327–336.
- Elser, J. J., Fagan, W. F., Denno, R. F., Dobberfuhl, D. R., Folarin, A., Huberty, A., Interlandi, S., Kilham, S. S., McCauley, E., Schulz, K. L., Siemann, E. H., & Sterner, R. W. (2000). Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408(6812), 578–580. <https://doi.org/10.1038/35046058>
- Erdoğan, E., Kaya, O., Derin, E., & Çakaloğlu Ebcim, B. (2022). Hava Bazlı Proteinin Alternatif Bir Protein Kaynağı Olarak Kullanım Olanaklarının İncelenmesi. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 5(3), 643–668. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.1096533>
- Ghughuskar, M. M., & Project, C. (2024). Peer-Reviewed Journal Single Cell Protein And Its Importance In Food Single Cell Protein And Its Importance In Food. January.

Gouveia, L., Batista, A. P., Sousa, I., Raymundo, A., & Bandarra, N. M. (2009). Microalgae in novel food products. In *Algae: Nutrition, Pollution Control and Energy Sources* (Issue January).

Khan Yousufi, M. (2012). To Determine Protein Content of Single Cell Protein Produced By Using Various Combinations of Fruit Wastes and Two Standard Food Fungi. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 3(1), 533–536. <http://www.bipublication.com>

Kurbanoğlu, E. B., & Kurbanoğlu, E. B. (2001). Production of Single-Cell Protein from Ram Horn Hydrolysate. *Turkish Journal of Biology*, 25(4), 371–377. <https://journals.tubitak.gov.tr/biology/vol25/iss4/2%0Ahttp://revist.as.ucm.es/index.php/DIDA/article/view/20047>

Malav, A., & Dube, P. (2017). Single Cell Protein Production Using Various Microbial Mass: a Review. *International Journal of Advanced Research*, 5(7), 2190–2194. <https://doi.org/10.21474/ijar01/4959>

Matassa, S., Verstraete, W., Pikaar, I., & Boon, N. (2016). Autotrophic nitrogen assimilation and carbon capture for microbial protein production by a novel enrichment of hydrogen-oxidizing bacteria. *Water Research*, 101, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.077>

Nasseri, A.T., Morowvat, M.H., Amini, R.S. and Ghasemi, Y. (2011). Scp Research Paper.Pdf. In *American journal of food technology* (Vol. 6, Issue 2, pp. 103–116). <https://scialert.net/abstract/?doi=ajft.2011.103.116>

Nasseri, A. T., Rasoul-Amini, S., Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y. (2011). Single cell protein: Production and process. *American Journal of Food Technology*, 6(2), 103–116. <https://doi.org/10.3923/ajft.2011.103.116>

Oliva-Teles, A., & Gonçalves, P. (2001). Partial replacement of fishmeal by brewers yeast (*Saccaromyces cerevisiae*) in diets for sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Aquaculture*, 202(3–4), 269–278. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00777-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00777-3)

Pikaar, I., Matassa, S., Rabaey, K., Bodirsky, B. L., Popp, A., Herrero, M., & Verstraete, W. (2017). Microbes and the Next Nitrogen Revolution. *Environmental Science and Technology*, 51(13), 7297–7303. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00916>

Poel, van der A. F. B., Krimpen, van M. M., Veldkamp, T., & Kwakkel, R. P. (2013). Unconventional protein sources for poultry feeding – opportunities and threats. Wageningen UR Livestock Research, Edelhertlaan, 1–14. <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:library.wur.nl:wurpubs/442294>

Raja, R., Hemaiswarya, S., Kumar, N. A., Sridhar, S., & Rengasamy, R. (2008). A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Critical Reviews in Microbiology*, 34(2), 77–88. <https://doi.org/10.1080/10408410802086783>

Rasoul-Amini, S., Ghasemi, Y., Morowvat, M. H., & Mohagheghzadeh, A. (2009). PCR amplification of 18S rRNA, single cell protein production and fatty acid evaluation of some naturally isolated microalgae. *Food Chemistry*, 116(1), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.025>

Srividya, R., Vishnuvarthan, J., Murugappan, M., & Dahake, P. (2013). Single cell Protein- A Review *International Journal for Pharmaceutical Research Scholars (IJPRS)* Single Cell Protein- A Review. *International Journal for Pharmaceutical Research Scholars(IJPRS)*, 2(JANUARY 2014), 1–4.

Stoffel, F., Santana, W. de O., Fontana, R. C., & Camassola, M. (2021). Use of *Pleurotus albidus* mycoprotein flour to produce

cookies: Evaluation of nutritional enrichment and biological activity. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 68(February), 102642. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102642>

Suman, G., Nupur, M., Anuradha, S., & Pradeep, B. (2015). Single cell protein production: A review. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 4(9), 251–262. <http://www.ijcmas.com>

Volova, T. G., & Barashkov, V. A. (2010). Characteristics of proteins synthesized by hydrogen-oxidizing microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 46(6), 574–579. <https://doi.org/10.1134/S0003683810060037>

Walsh, B. J., Rydzak, F., Palazzo, A., Kraxner, F., Herrero, M., Schenk, P. M., Ciaï, P., Janssens, I. A., Peñuelas, J., Niederl-Schmidinger, A., & Obersteiner, M. (2015). New feed sources key to ambitious climate targets. *Carbon Balance and Management*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0040-7>Giriş

BÖLÜM 8

ET VE ET ÜRÜNLERİNDE RAF ÖMRÜ VE AMBALAJLAMA STRATEJİLERİ: GELENEKSEL SİSTEMLER VE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR

Nursel SÖYLEMEZ MİLLİ ¹
Şehriban OĞUZ ²

Giriş

Et ve et ürünleri yüksek biyolojik değere sahip protein, esansiyel amino asitler ve mikro besin öğeleri açısından zengin olmakla birlikte, yüksek su aktivitesi ve besin matrisi nedeniyle mikrobiyal gelişim ve oksidatif değişimlere son derece açıktır (Zhu & ark., 2022; Snyder, Martin & Wiedmann, 2024). Bu nedenle raf ömrü, yalnızca depolama süresini değil ürünün duyusal kabul edilebilirliği, kimyasal stabilitesi ve mikrobiyal güvenliğinin eşzamanlı olarak sürdürülebildiği kontrollü kalite penceresini ifade eder (Katiyo & ark., 2020; Toomik & ark., 2023).

¹ Öğr. Gör. Dr, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bilimsel Endüstriyel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi (BETUM), Orcid: 0000-0003-3610-2706

² Dr. Öğretim Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6889-9487

Bozulma dinamiklerinin merkezinde, belirli koşullarda seçilerek baskınlaşan spesifik bozulma organizmalarının (SSO) metabolik aktiviteleri ve bu aktivitelerin oluşturduğu uçucu/çözünen metabolit profili yer alır (Casaburi & ark., 2015; Saenz-García & ark., 2020). Bu çerçevede ambalajlama et yüzeyindeki mikro çevreyi (oksijen erişimi, CO₂ düzeyi, nem/yoğunlaşma) düzenleyerek mikrobiyal ekolojiyi ve oksidatif reaksiyonları yöneten kritik bir kontrol arayüzü olarak konumlanır (McMillin, 2017; Kandeepan & Tahseen, 2022).

Bu bölümde önce et ve et ürünlerinde bozulma mekanizmaları ve raf ömrü tanımı açıklanmakta ve ardından ambalajlama prensipleri ele alınmaktadır. Devamında geleneksel sistemler (aerobik paketleme, vakum paketleme, MAP) ile yenilikçi yaklaşımlar (aktif, akıllı ve biyobazlı/nano-yapılandırılmış ambalajlar) raf ömrüne katkıları ve sınırlılıklarıyla tartışılmaktadır (Cenci-Goga & ark., 2020; Gil & Rudy, 2023; Sani & ark., 2024).

Et ve Et Ürünlerinde Bozulma Mekanizmaları

Et ve et ürünlerinde bozulma mikrobiyal gelişim, lipit ve protein oksidasyonu, pigment dönüşümleri, su tutma kapasitesi kayıpları ve enzimatik/non-enzimatik reaksiyonların eşzamanlı ilerlediği çok bileşenli bir süreçtir (Casaburi & ark., 2015; Zhu & ark., 2022; Snyder & ark., 2024). Süreç, ürünün duyuşal kabul edilebilirliğini (koku, lezzet, renk, yüzey yapısı) azaltan metabolitlerin ve yapısal değişimlerin birikmesiyle görünür hâle gelir (Casaburi & ark., 2015; Katiyo & ark., 2020). Bozulma, duyuşal reddin oluşması ve buna eşlik eden mikrobiyolojik kriterlerin veya kimyasal indikatörlerin kabul edilebilir sınırları aşmasıdır (Snyder & ark., 2024; Abdullah & ark., 2025).

Bozulma dinamiklerini belirleyen etmenler, içsel faktörler (pH, *aw*, besin matrisi, redoks potansiyeli, miyogloblin/hem demiri, yağ kompozisyonu) ve dışsal faktörler (sıcaklık, ambalaj atmosferi,

oksijen mevcudiyeti, CO₂ düzeyi, başlangıç kontaminasyonu ve hijyen) olarak iki grupta değerlendirilir (Doulgeraki & ark., 2012; Zhu & ark., 2022; Toomik & ark., 2023). Bu nedenle raf ömrü, yalnızca toplam bakteri sayısının artışı ile açıklanamaz. Belirli koşullarda seçilerek baskınlaşan SSO'nun metabolik aktiviteleri ve bu aktivitelerin ürettiği metabolitler raf ömrünün yönünü belirler (Casaburi & ark., 2015; Saenz-García & ark., 2020).

a) Kırmızı Ette Mikrobiyolojik Bozulma

Kırmızı ette başlangıç mikroflorası kesim hijyeni, deri ve gastrointestinal kaynaklı kontaminasyon, ekipman yüzeyleri ve ortam havası gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Depolama koşulları, mikrofloranın kompozisyonunu kısa sürede yeniden şekillendirir (Doulgeraki & ark., 2012; Pellissery & ark., 2020). Karkas yüzeyinde *Staphylococcus* ve *Streptococcus* gibi Gram-pozitifler ile *Brochothrix*, *Psychrobacter*, *Acinetobacter* ve laktik asit bakterileri (LAB) yer alabilir. Aerobik depolamada ise *Pseudomonas* spp. Ve bazı *Enterobacteriaceae* üyeleri bozulmada sıklıkla baskınlaşır (Doulgeraki & ark., 2012; Pellissery & ark., 2020; Zhu & ark., 2022).

Aerobik koşullarda soğukta depolanan kırmızı ette bozulma, çoğunlukla psikrotrof aerobların rekabet üstünlüğüyle ilerler. Bu bağlamda *Pseudomonas* spp. (özellikle *P. fragi*, *P. fluorescens*, *P. putida*), *Acinetobacter*, *Moraxella* ve bazı *Enterobacteriaceae* türleri ile Gram-pozitif tarafta *Brochothrix thermosphacta* öne çıkar (Doulgeraki & ark., 2012; Casaburi & ark., 2015; Zhu & ark., 2022). *Pseudomonas* türleri et yüzeyindeki çözünmüş oksijeni hızla tüketerek ekolojik üstünlük sağlar. Proteolitik ve lipolitik aktiviteler sonucunda kükürtlü uçucular, ketonlar, aldehitler ve esterler gibi bileşikler artırır. Bu metabolitler bozulmuş et kokusu, yüzeyde mukus/kayganlık ve renk matlaşması gibi fenotiplerle ilişkilidir (Casaburi & ark., 2015; Han & ark., 2025).

Gram-pozitif bir bozulma etkeni olan *B. thermosphacta*, özellikle soğukta depolanan ve ambalaj atmosferi kısıtlanan ürünlerde önem kazanabilir. Bu türün metabolizması asetik asit gibi organik asitler ve diğer uçucu bileşikler üzerinden ekşi/keskin koku-tat kusurlarıyla ilişkilendirilmiştir (Casaburi & ark., 2015; Pellissery & ark., 2020). Raf ömrü değerlendirmelerinde, aynı toplam sayım düzeyinde dahi duyuşal çıktıkların ürün kompozisyonuna ve baskın türlere göre değişebilmesi nedeniyle SSO kompozisyonunun kritik olduğu vurgulanmaktadır (Pellissery & ark., 2020; Snyder & ark., 2024).

Vakum veya MAP gibi oksijeni sınırlayan sistemlerde mikrobiyal ekoloji belirgin biçimde değişir. Aerobik *Pseudomonas* türlerinin gördeli baskınlığı azalırken fakültatif anaerob *Enterobacteriaceae*, bazı LAB türleri ve *Brochothrix* nispeten daha baskın hâle gelebilir (Pennacchia & ark., 2011; Doulgeraki & ark., 2012; Zhu & ark., 2022). Bu koşullarda bozulma daha çok ekşimsi/asidik notalar ve farklı bir uçucu profil ile karakterize olabilir (Pennacchia & ark., 2011; Toomik & ark., 2023). Ayrıca vakum paketli kırmızı ette toplam sayım çok yüksek değerlere ulaşmadan da duyuşal ret gelişebildiğı, bunun toplam yükten çok kompozisyon ve metabolit birikimiyle ilişkili olduğu bildirilmektedir (Pellissery & ark., 2020; Toomik & ark., 2023).

b) Kanatlı Etinde Mikrobiyolojik Bozulma

Kanatlı eti, yüksek su aktivitesi, geniş yüzey alanı ve çoğunlukla parça hâlinde pazarlanması nedeniyle bozulmaya elverişlidir (Yu & ark., 2019; Snyder & ark., 2024). Aerobik depolamada psikrotrof mikroorganizmalar hızla baskın hâle gelir. Bu florada *Pseudomonas* spp., *Acinetobacter*, *Enterobacteriaceae*, *B. thermosphacta* ve değişen oranlarda LAB bulunduğu gösterilmiştir (Balamatsia & ark., 2006; Dourou & ark., 2021; Augustyńska-Prejsnar & ark., 2024). Kanatlı eti bozulmasında SSO yaklaşımı

özellikle kritiktir. Duyusal reddin ortaya çıkışı çoğu durumda toplam mikrobiyal yükten ziyade, sınırlı sayıdaki baskın türün ürettiği uçucu metabolitlerin birikimiyle ilişkilidir (Wang & ark., 2017; Saenz-García & ark., 2020).

Bozulma *Pseudomonas* spp. (mukus oluşumu, kötü koku, pigment oksidasyonu), *Brochothrix* (mukus/ekşi tat), *Enterobacteriaceae* (gaz/koku kusurları) ve koşullara bağlı olarak *Shewanella* ve *Photobacterium* gibi baskın türler ile ilişkilendirilir (Saenz-García & ark., 2020; Zhu & ark., 2022). Duyusal olarak reddedilen tavuk örneklerinde *Pseudomonas*'a ek olarak *Shewanella*, *Photobacterium* ve bazı *Serratia* suşlarının bozulma potansiyeli hem *in vitro* hem *in situ* yaklaşımlarla gösterilmiştir (Wang & ark., 2017; Tao & ark., 2025).

Depolama sıcaklığı, kanatlı etinde bozulma mikrobiyotasını belirleyen en kritik dışsal faktörlerdendir. 4 °C civarında depolanan ürünlerde psikrotrof *Pseudomonas* ve *Brochothrix* ağırlığı sıklıkla vurgulanırken; sıcaklık dalgalanmaları *Enterobacteriaceae* üyelerinin görelî payını artırarak bozulma hızını ve paternini değiştirebilir (Ghollasi-Mood & ark., 2017; Augustyńska-Prejsnar & ark., 2024). NGS temelli çalışmalar, depolamanın erken döneminde *Pseudomonas*'ın hızla artabildiğini, ilerleyen dönemlerde ise *Brochothrix*, LAB ve bazı *Photobacterium* türlerinin süreçte daha etkin hâle gelebildiğini ortaya koymuştur (Höll, Behr, & Vogel, 2016; Dourou & ark., 2021). Ayrıca MAP koşullarında *Photobacterium* metabolik aktivitesinin metatranskriptomik verilerle *in situ* tahmin edilebilmesi, bozulmanın yalnız varlık-yokluk düzeyinde değil metabolik aktivite düzeyinde de değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir (Höll & ark., 2019).

Kanatlı etinde bozulma fenotipleri renk değişimi, yüzeyde mukus/kayganlık, amonyak benzeri-sülfürlü koku notaları, pH kaymaları, TVB-N (total volatile basic nitrogen) artışı ve tekstürel bozulma ile karakterizedir (Katiyo & ark., 2020; Augustyńska-

Prejsnar & ark., 2024). Bu fenotiplerle mikrobiyal yük ve tür bileşimi arasındaki ilişkiler, raf ömrü tanımı ve ambalaj/depolama koşullarının optimize edilmesi için temel kanıt setini oluşturur (Katiyo & ark., 2020; Zhu & ark., 2022).

c) Bozulma İndikatörleri ve Raf Ömrü

Et ve et ürünlerinde raf ömrü, ürün güvenliğinin kabul edilebilir düzeyde kaldığı, ancak bozulma indikatörlerinin duyuşal veya analitik eşikleri aştığı süre olarak tanımlanabilir (Zhu & ark., 2022; Snyder & ark., 2024). Mikrobiyolojik açıdan toplam aerobik mezofilik bakteri sayısı ve/veya psikrotrof yük ile SSO baskınlığı, raf ömrü sonunu işaret eden göstergeler arasında değerlendirilir (Erkmen & Bozoğlu, 2016; Abdullah & ark., 2025). Güncel yaklaşım ise tek bir sayısal eşik yerine, mikrobiyal kompozisyon, metabolit profili ve duyuşal verinin birlikte yorumlanmasını raf ömrü yönetimi açısından daha güvenilir bulmaktadır (Zhu & ark., 2022; Snyder & ark., 2024).

Kimyasal indikatörler arasında TVB-N, biyojen aminler (özellikle putresin, kadaverin, tiramin, histamin), lipit oksidasyon göstergeleri ve bozulma ile ilişkili uçucu organik bileşikler (VOC) öne çıkar (Balamatsia & ark., 2006; Casaburi & ark., 2015; Han & ark., 2025). Uçucu profilin GC–MS gibi analitik yöntemlerle izlenmesi, bozulma mikrobiyotası ile aroma kusurlarının ilişkilendirilmesinde güçlü bir çerçeve sunar (Casaburi & ark., 2015; Han & ark., 2025). Benzer şekilde biyojen amin birikimi, mikrobiyal dekarboksilasyon kapasitesi ve depolama koşullarıyla ilişkili olduğundan, raf ömrü değerlendirmelerinde ambalaj atmosferi ve sıcaklık ile birlikte ele alınmalıdır (Balamatsia & ark., 2006; Zhu & ark., 2022).

Et ve Et Ürünlerinde Ambalajlama Prensipleri

Ambalajlama, et ve et ürünlerinde mikrobiyal ekolojiyi ve oksidatif reaksiyonları yöneterek raf ömrü ve kaliteyi belirleyen kritik bir kontrol arayüzüdür. Ambalajın temel işlevleri, dış çevreden kontaminasyonu sınırlamak, oksijen/CO₂/su buharı etkileşimini kontrol etmek, oksidatif değişimleri yavaşlatmak ve tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği desteklemektir (McMillin, 2017; Cenci-Goga & ark., 2020; Sani & ark., 2024). Ambalaj, oksijen erişimi, CO₂ düzeyi ve yüzey nemi üzerinden hangi mikroorganizmaların avantaj kazanacağını ve hangi metabolitlerin birikeceğini belirler (Kandeepan & Tahseen, 2022; Toomik & ark., 2023).

Bu nedenle ambalajlama prensipleri; (i) bariyer fonksiyonu ve atmosfer yönetimi, (ii) mikrobiyotambalajraf ömrü etkileşimi, (iii) ambalajgıda etkileşimi (kimyasal güvenlik) ve sürdürülebilirlik eksenlerinde birlikte ele alınmalıdır (McMillin, 2017; Cenci-Goga & ark., 2020; Gil & Rudy, 2023).

a) Bariyer Fonksiyonu ve Ambalaj İçi Atmosferin Yönetimi

Raf ömrünü belirleyen temel unsurlardan biri, ambalaj materyalinin OTR (Oxygen transmission rate-oksijen geçirgenlik oranı), CO₂ geçirgenliği ve WVTR (*water vapor transmission rate-su buharı iletim hızı*) gibi bariyer parametreleri üzerinden tepe boşluğu atmosferini zamanla nasıl değiştirdiğidir (McMillin, 2017; Gil & Rudy, 2023). Oksijen, aerobik bozulma florasının büyümesini ve pigment/lipit oksidasyonunu desteklerken, CO₂ uygun düzeylerde özellikle aerobik Gram-negatiflerin büyümesini baskılayabilen bir atmosfer düzenleyicisidir (McMillin, 2017; Kandeepan & Tahseen, 2022). Bu nedenle tasarımda yalnız başlangıç gaz kompozisyonu değil, zaman-sıcaklıkgeçirgenlik etkileşimiyle oluşan dinamik atmosfer profili hedeflenmelidir (Kandeepan & Tahseen, 2022; Sani & ark., 2024).

b) Mikrobiyota–Ambalaj–Raf Ömrü İlişkisi

Ambalaj, yüzey mikrobiyotasının kompozisyonunu değiştirerek raf ömrünü uzatabilir. Ancak bu uzama çoğu durumda bozulmayı ortadan kaldırmaktan çok, bozulmanın fenotipini ve baskın metabolit profilini yeniden biçimlendirmeyi ifade eder (Cenci-Goga & ark., 2020; Toomik & ark., 2023). Bu nedenle değerlendirmelerde toplam sayım kadar SSO kompozisyonu ve metabolit birikimi de dikkate alınmalıdır (Zhu & ark., 2022; Sani & ark., 2024).

c) Ambalaj–Gıda Etkileşimi, Güvenlik ve Fonksiyonel Tasarım

Yağ içeriği görece yüksek matrislerde ambalaj bileşenlerinin migrasyonu, kimyasal güvenlik açısından kritik bir başlıktır. Bu nedenle ambalaj, raf ömrü performansına ek olarak gıda ile temas güvenliği, süreç/depolama koşullarıyla uyumluluk ve mevzuat uygunluğu çerçevesinde tasarlanmalıdır (Gil & Rudy, 2023; Sani & ark., 2024).

Fonksiyonel ambalaj yaklaşımı, antimikrobiyal/antioksidan ajanlar, yenilebilir film/kaplamalar, nano-taşıyıcılar ve kontrollü salım mekanizmalarıyla raf ömrü yönetimini güçlendirmeyi hedefler (Gagaoua, 2022; Fadji & ark., 2023). Bu sistemlerin endüstriyel uygulanabilirliği etkinlik, duyuusal etki, maliyet ve mevzuat uyumunun eşzamanlı sağlanmasına bağlıdır (Sani & ark., 2024; Nouri & ark., 2025).

d) Sürdürülebilirlik ve Dijitalleşme Perspektifi

Ambalaj atığının azaltılması hedefi, sürdürülebilirliği ambalaj tasarımının merkezine taşımıştır. Güncel eğilim, geri dönüştürülebilir, çevre dostu materyaller geliştirilirken bariyer

performansı ve mikrobiyal kontrolün zayıflatılmadığı denge tasarımlarına yönelmektedir (Gil & Rudy, 2023; Sani & ark., 2024). Akıllı ambalaj ve izlenebilirlik çözümleri ise raf ömrünün statik bir etiket süresinden çıkarak ürün-parti bazlı dinamik bir yönetim parametresine evrilmesini destekler (Ahmed & ark., 2018; Vasuki & ark., 2023; Garg & ark., 2026).

Geleneksel Ambalajlama Sistemleri

a) Aerobik (*Overwrap*) Sistemleri

Perakende taze et satışında en yaygın yaklaşım, ürünün tepsiye yerleştirilip oksijen geçirgen bir filmle sarıldığı aerobik (*overwrap*) ambalajdır. Bu sistem, yüksek oksijen erişimi nedeniyle özellikle kırmızı ette parlak renk algısını (oksimiyoglobinin) destekler, ancak aynı oksijen varlığı lipid oksidasyonunu ve aerobik psikrotrof bozulma florasını hızlandırarak raf ömrünü sınırlar (Nassu & ark., 2010; McMillin, 2017). Bu nedenle sistem, görsel kalite açısından avantaj sağlasa da raf ömrü yönetiminde soğuk zincir istikrarına yüksek düzeyde bağımlıdır (McMillin, 2017; Kandeepan & Tahseen, 2022).

b) Vakum Paketleme ve Vakum-Deri Paketleme (VSP) Sistemleri

Vakum paketleme, ambalaj içindeki havanın uzaklaştırılmasıyla oksijenin kısıtlandığı ve aerobik bozulma etmenlerinin rekabet avantajının azaltıldığı bir yaklaşımdır (McMillin, 2017; Toomik & ark., 2023). Bu mekanizma raf ömrünü uzatabilse de mikrobiyal kompozisyonu değiştirerek bozulma fenotipini dönüştürebilir (Zhu & ark., 2022; Toomik & ark., 2023). Vakum-deri paketleme (VSP) uygulamalarında film-ürün teması artar ve fiziksel stabilite güçlenir. Ancak duyuusal reddi belirleyen

kusurlar ürün tipine ve depolama koşullarına bağlı olarak farklılaşabilir (McMillin, 2017; Toomik & ark., 2023).

c) Modifiye Atmosfer Paketleme (MAP)

MAP, ambalaj içi atmosferin ürün tipine ve hedef raf ömrüne göre kontrol edilmesine dayanır (McMillin, 2017). Kırmızı et uygulamalarında yüksek O₂ karışımları renk stabilitesini desteklerken, CO₂ birçok aerobik bozulma bakterisi üzerinde bakteriyostatik etki gösterebilir. Bununla birlikte gaz kompozisyonu seçiminde renk–oksidasyon–mikrobiyal kontrol dengesi kritik önemdedir (McMillin, 2017; Kandeepan & Tahseen, 2022). MAP’nin etkinliği, film geçirgenliği ve soğuk zincir yönetimiyle doğrudan ilişkilidir. Uygun tasarım sağlanmadığında tepe boşluğu atmosferi zamanla hedef profilden sapabilir (McMillin, 2017; Sani & ark., 2024).

Yenilikçi Ambalajlama Sistemleri

a) Aktif Ambalaj

Aktif ambalaj sistemleri, ambalajın yalnızca “pasif bariyer” işleviyle sınırlı kalmayıp paket içi atmosferi ve/veya ürün yüzeyindeki mikro çevreyi hedefli biçimde düzenleyerek bozulma kinetiğini yavaşlatmayı amaçladığı yaklaşımları kapsar. Et ve et ürünlerinde aktif ambalajın temel etkisi, (i) oksijen mevcudiyetinin azaltılması ve redoks dengesinin yönetilmesi, (ii) CO₂ düzeyinin bozulma florası üzerinde baskılayıcı olacak şekilde kontrol edilmesi, (iii) oksidatif süreçlerin (lipit/pigment oksidasyonu) inhibe edilmesi ve (iv) yüzey mikrobiyotasına doğrudan antimikrobiyal baskı uygulanması üzerinden açıklanır (Cenci-Goga & ark., 2020; Fadji & ark., 2023).

Bu çerçevede oksijen tutucu sistemler, özellikle aerobik Gram-negatif bozulma florasının baskılanması ve oksidatif acılaşmanın geciktirilmesi açısından kritik bir araçtır. Oksijenin azaltılması, hem pigment stabilitesini hem de lipid oksidasyon zincir reaksiyonlarını etkileyerek duyuşal kusurların gelişimini yavaşlatabilir. CO₂ yayıcı/absorblayıcı çözümler ise paket içi gaz kompozisyonunu daha stabil tutmayı hedefler. Böylece yüksek CO₂'nin bakteriyostatik etkisinden yararlanılırken, aşırı CO₂ birikiminin neden olabileceği doku üzerinde olası etkiler, paket içi duyuşal algı değişimleri gibi istenmeyen kalite etkileri sınırlandırılabilir (Cenci-Goga & ark., 2020).

Antimikrobiyal/antioksidan ajanların polimer matrislere entegre edilmesi veya taşıyıcı sistemler üzerinden kontrollü salımı, özellikle et yüzeyinde gelişen SSO'ya karşı doğrudan müdahale olanağı sağlar. Bununla birlikte etkinlik, yalnızca “ajan seçimi” ile değil, ajan-polimer uyumu, salım kinetiğı (difüzyon/kontrol mekanizması), ürün matrisi (yağ/su oranı) ve depolama koşullarıyla birlikte belirlenir. Bu nedenle aktif ambalaj tasarımları, hedef bozulma paternine göre rasyonel olarak kurgulanmalıdır (Fadiji & ark., 2023).

Aktif sistemlerin değerlendirilmesinde ikinci kritik boyut güvenliktir. Gıda ile temas eden materyallerde migrasyon riski, özellikle yağlı matriste belirginleşebildiğinden, aktif bileşenlerin toplam/spesifik migrasyon sınırları, toksikolojik değerlendirme ve mevzuat uyumu performans metrikleriyle birlikte ele alınmalıdır (Alamri & ark., 2021; Şeref & Cüfaoğlu, 2025). Bu bağlamda “raf ömrü artışı” tek başına yeterli bir başarı ölçütü değildir. Duyuşal kabul edilebilirlik, kimyasal güvenlik ve proses tekrarlanabilirliğı birlikte sağlandığında aktif ambalaj endüstriyel ölçekte anlamlı hâle gelir.

b) Akıllı Ambalaj

Akıllı ambalaj sistemleri, ürünün kalite durumunu paket içinde “ölçülebilir ve izlenebilir” hâle getirerek raf ömrünün statik bir etiket süresi olmaktan çıkarılıp koşullara duyarlı bir yönetim değişkenine dönüştürülmesini hedefler. Bu sistemler; tazelik/bozulma metabolitleri, gaz kompozisyonu, sıcaklık geçmişi ve/veya mikrobiyal aktiviteyle ilişkili parametrelere yanıt veren indikatör ve sensör tabanlı çözümlerden oluşur (Ahmed & ark., 2018; Vasuki & ark., 2023; Milli, Söylemez Milli & Parlak, 2025; Parlak, Milli & Milli, 2025; Söylemez Milli, Parlak & Milli, 2025). Et ürünleri özelinde pH değişimleri, TVB-N ve biyojen aminler gibi bazik uçucular, CO₂/O₂ dinamikleri veya belirli uçucu organik bileşik profilleri, indikatör tasarımında hedef analitler olarak öne çıkar.

Akıllı ambalajın endüstriyel değer önerisi iki düzeyde değerlendirilmelidir. Birinci düzey, tüketiciye ve perakendeye “kalite bilgisi” sunarak yanlış sınıflandırmayı azaltmaktır. İkinci düzey ise tedarik zinciri kararlarını veriyle destekleyerek gıda israfını azaltmaktır (Vasuki & ark., 2023; Garg & ark., 2026). Ancak bu kazanımlar, sensör/indikatörün gerçek ürün koşullarında doğrulanmasıyla mümkündür. Çünkü laboratuvarı ümit verici görünen bir sensör, gerçek üründe matris etkileri, nem yoğunlaşması, paket içi heterojenlik, sıcaklık dalgalanmaları ve interferans gazlar nedeniyle sapma gösterebilir. Bu nedenle standardizasyon, kalibrasyon stratejileri, doğrulama protokolleri ve maliyet-etkinlik analizi endüstriyel ölçeklenebilirliğin temel belirleyicileridir (Sani & ark., 2024; Garg & ark., 2026).

c) Biyobazlı Materyaller, Yenilebilir Kaplamalar ve Nano-Yapılandırılmış Yüzeyler

Biyobazlı/biyobozunur polimerler ve yenilebilir kaplamalar, sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu biçimde raf ömrü performansını artırma potansiyeli taşıyan yenilikçi ambalaj yaklaşımlarıdır. Bu materyallerin temel iddiası, çevresel yükü azaltırken kütle transferini (O_2/CO_2 /su buharı) kontrol ederek oksidatif süreçleri ve mikrobiyal büyümeyi yavaşlatabilmektir. Bununla birlikte et gibi yüksek su aktivitesine sahip, yağ içeriği bulunan ve oksidasyona duyarlı matrislerde biyobazlı materyallerin bariyer performansı ve mekanik dayanımı çoğu zaman sınırlayıcıdır. Bu nedenle pratik uygulamalar, nano-dolgu ile güçlendirme, çok katmanlı yapı tasarımı veya aktif bileşen entegrasyonu gibi fonksiyonelleştirme stratejileriyle birlikte ele alınır (Song & ark., 2021; Fadji & ark., 2023).

Yenilebilir kaplamalar, et yüzeyinde bir “mikro-bariyer” oluşturarak oksijen difüzyonunu ve yüzey nem dengesini değiştirebilir. Uygun formülasyonlarda antioksidan ve antimikrobiyal ajanlarla birlikte kullanıldığında raf ömrüne çift yönlü katkı sağlayabilir (Song & ark., 2021). Nano-yapılandırılmış yüzeyler ve elektrospin nanofiber taşıyıcılar ise aktif ajanların daha kontrollü taşınması/salımı ve yüzey fonksiyonelleştirmesi açısından ileri bir tasarım alanı sunar (Ebrahimzadeh & ark., 2022). Bununla birlikte, biyobazlı ve nano-yapılandırılmış sistemlerde katkı maddesi güvenliği, kimyasal migrasyon ve gıda ile temas uygunluğu tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır. Performans artışı iddiası, mevzuata uygun güvenlik değerlendirmeleriyle birlikte raporlanmadığında endüstriyel uygulanabilirlik zayıflar (Alamri & ark., 2021; Şeref & Cüfaoğlu, 2025).

Sonuç

Et ve et ürünlerinde raf ömrü, tek başına toplam mikrobiyal yük artışıyla açıklanamayacak kadar çok boyutlu bir olgudur. Raf ömrünü belirleyen temel unsur, belirli depolama ve ambalaj koşullarında seçilerek baskınlaşan spesifik bozulma organizmalarının metabolik aktivitesi ve bu aktivitenin ortaya çıkardığı metabolit profilidir. Bu nedenle raf ömrü değerlendirmesi, toplam sayım verilerinin yanı sıra mikrobiyal kompozisyon, duyuusal fenotipler ve kimyasal indikatörlerin birlikte yorumlanmasına dayanmalıdır.

Ambalajlama, bu ekosistemi yöneten en kritik kontrol noktasıdır. Geleneksel sistemler renk yönetimi ve pratik uygulama avantajı sunarken, oksijen ve CO₂ dengesi üzerinden mikrobiyal seçilimi değiştirerek bozulma paternini de dönüştürür. Yenilikçi yaklaşımlar ise izleme, hedefli inhibisyon ve sürdürülebilirlik boyutlarını raf ömrü yönetimine entegre etme potansiyeli taşır. Bununla birlikte endüstriyel uygulanabilirlik; doğrulama/standardizasyon, maliyet, kimyasal güvenlik ve mevzuat uyumu gibi kriterlerin birlikte sağlanmasını gerektirir.

Kaynakça

Abdullah, A. Y., Al-Nabulsi, A., Jamama'h, M., Khataybeh, B. & Al-Ghadi, M. (2025). Microbial shelf life and quality assessment of broiler breast meat: The role of cold storage and carcass weight. *Foods*, 14 (4), 640. <https://doi.org/10.3390/foods14040640>

Ahmed, I., Hayat, Z., Shehzad, A. & Hussain, S. (2018). An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products. *Packaging Technology and Science*, 31 (7), 449–471. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.012>

Alamri, M. S., Qasem, A. A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G., Alqah, H. A. & Qasha, A. S. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28 (8), 4490–4499. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047>

Augustyńska-Prejsnar, A., Kačániová, M., Hanus, P., Sokołowicz, Z. & Słowiński, M. (2024). Microbial and sensory quality changes in broiler chicken breast meat during refrigerated storage. *Foods*, 13 (24), 4063. <https://doi.org/10.3390/foods13244063>

Balamatsia, C. C., Paleologos, E. K., Kontominas, M. G. & Savvaidis, I. N. (2006). Correlation between microbial flora, sensory changes and biogenic amines formation in fresh chicken meat stored aerobically or under modified atmosphere packaging at 4 °C. *Antonie van Leeuwenhoek*, 89 (1), 9–17. <https://doi.org/10.1007/s10482-005-9003-4>

Casaburi, A., Piombino, P., Nychas, G.-J. E., Villani, F. & Ercolini, D. (2015). Bacterial populations and the volatilome associated to meat spoilage. *Food Microbiology*, 45, 83–102. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.002>

Cenci-Goga, B. T., Iulietto, M. F., Sechi, P., Borgogni, E., Karama, M. & Grispoldi, L. (2020). New trends in meat packaging. *Microbiological Research*, 11, 56–67. <https://doi.org/10.3390/microbiolres11020010>

Dourou, D., Spyrelli, E. D., Doulgeraki, A. I., Argyri, A. A., Grounta, A., Nychas, G.-J. E., Chorianopoulos, N. G. & Tassou, C. C. (2021). Microbiota of chicken breast and thigh fillets stored under different refrigeration temperatures assessed by next-generation sequencing. *Foods*, 10 (4), 765. . <https://doi.org/10.3390/foods10040765>

Doulgeraki, A. I., Ercolini, D., Villani, F. & Nychas, G.-J. E. (2012). Spoilage microbiota associated to the storage of raw meat in different conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 157 (2), 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.05.020>

Ebrahimzadeh, S., Biswas, D., Roy, S. & McClements, D. J. (2023). Incorporation of essential oils in edible seaweed-based films: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 135, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.015>

Erkmen, O. & Bozoğlu, T. (2016). Spoilage of meat and meat products. In *Food microbiology: Principles into practice* (ss. 213–247).

Fadiji, T., Rashvand, M., Daramola, M. O. & Iwarere, S. A. (2023). A review on antimicrobial packaging for extending the shelf life of food. *Processes*, 11 (2), 590. <https://doi.org/10.3390/pr11020590>

Gagaoua, M. (2022). Recent advances in OMICs technologies and application for ensuring meat quality, safety and authenticity. *Foods*, 11 (16), 2532. DOI: [10.3390/foods11162532](https://doi.org/10.3390/foods11162532)

Garg, L., Yadav, S., Kumar, K., Raposo, A. & Thakur, N. (2026). From farm to fork: Enhancing meat traceability and safety with

intelligent packaging. *Food Control*, 183, 111900.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111900>

Ghollasi-Mood, F., Mohsenzadeh, M., Housaindokht, M. R. & Varidi, M. (2017). Microbial and chemical spoilage of chicken meat during storage at isothermal and fluctuation temperature under aerobic conditions. *Iranian Journal of Veterinary Science and Technology*, 8, 38–46. Doi. [10.22067/veterinary.v8i1.54563](https://doi.org/10.22067/veterinary.v8i1.54563)

Han, M., Gu, Q., Al-Dalali, S., Chen, C., Xu, B. & Li, P. (2025). Changes in volatile organic compounds of tray-packed fresh beef sausages under refrigeration: The roles of dominant spoilage bacteria. *Meat Science*, 229, 109914.
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2025.109914>

Höll, L., Behr, J. & Vogel, R. F. (2016). Identification and growth dynamics of meat spoilage microorganisms in modified atmosphere packaged poultry meat by MALDI-TOF MS. *Food Microbiology*, 62, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.07.003>

Höll, L., Hilgarth, M., Geissler, A. J., Behr, J. & Vogel, R. F. (2019). Prediction of in situ metabolism of photobacteria in modified atmosphere packaged poultry meat using metatranscriptomic data. *Microbiological Research*, 223–225, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.03.002>

Kandeeapan, G. & Tahseen, M. A. (2022). Modified atmosphere packaging of meat: An overview of concepts and applications. *Journal of Packaging Technology and Research*, 6, 137–148.
<https://doi.org/10.1007/s41783-022-00139-2>

Katiyo, W., de Kock, H. L., Coorey, R. & Buys, E. M. (2020). Sensory implications of chicken meat spoilage in relation to microbial and physicochemical characteristics during refrigerated storage. *LWT – Food Science and Technology*, 130, 109468.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109468>

Gil, M. & Rudy, M. (2023). Innovations in the Packaging of Meat and Meat Products—A Review. *Coatings*, 13 (2), 333. <https://doi.org/10.3390/coatings1302033>.

McMillin, K. W. (2017). Advancements in meat packaging. *Meat Science*, 132, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.015>

Milli, M., Söylemez Milli, N. & Parlak, İ. H. (2025). Rapid detection of honey adulteration using machine learning on gas sensor data. *Npj Science of Food*, 9, 74. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00440-9>

Nassu, R. T., Lima, A. L., Beserra, F. J. & Gama, L. T. (2010). Fresh meat packaging trends for retail and food service. *Meat Science*, 84 (2), 203–208. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20105055>

Nouri, M., Razavi, S. H., Afraei, M., Shafiepour, M. & Maleki Jahan, F. (2026). Recent trend in the shelf life extension of meat and meat products using edible packaging enriched with antimicrobial peptides (AMPs). *Food Control*, 181, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111768>

Parlak, İ. H., Milli, M. & Milli, N. S. (2025). Machine learning–based detection of olive oil adulteration using BME688 gas sensor matrix. *Food Analytical Methods*, 18, 1454–1464. <https://doi.org/10.1007/s12161-025-02803-0>

Pellissery, A. J., Venkitanarayanan, K. & Venkitanarayanan, K. (2020). Spoilage bacteria and meat quality. In *Meat quality analysis* (ss. 317–337). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819233-7.00017-3>

Pennacchia, C., Ercolini, D. & Villani, F. (2011). Spoilage-related microbiota associated with chilled beef stored in air or vacuum pack. *Food Microbiology*, 28 (1), 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.08.010>

Saenz-García, C. E., Castañeda-Serrano, P., Mercado-Silva, E. M., Alvarado, C. Z. & Nava, G. M. (2020). Insights into the identification of the specific spoilage organisms in chicken meat. *Foods*, 9 (2), 225. <https://doi.org/10.3390/foods9020225>

Sani, M., Zhang, W., Abedini, A., Khezerlou, A., Shariatifar, N., Assadpour, E., Zhang, F. & Jafari, S. M. (2024). Intelligent packaging systems for the quality and safety monitoring of meat products: From lab scale to industrialization. *Food Control*, 160, 110359. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110359>

Söylemez Milli, N., Parlak, İ. H. & Milli, M. (2025). A new approach for machine learning-based recognition of meat species using a BME688 gas sensors matrix. *Chiang Mai Journal of Science*, 52 (3). <https://doi.org/10.12982/CMJS.2025.031>

Snyder, A. B., Martin, N. & Wiedmann, M. (2024). Microbial food spoilage: Impact, causative agents and control strategies. *Nature Reviews Microbiology*, 22 (10), 706–721. <https://doi.org/10.1038/s41579-024-01037-x>

Song, D. H., Hoa, V. B., Kim, H. W., Khang, S. M., Cho, S. H., Ham, J. S. & Seol, K. H. (2021). Application of edible coatings for meat products: A review. *Coatings*, 11, 1344. <https://doi.org/10.3390/coatings11111344>

Şeref, N. & Cüfaoğlu, G. (2025). Food packaging and chemical migration: A food safety perspective. *Journal of Food Science*, 90 (5), e70265. DOI: [10.1111/1750-3841.70265](https://doi.org/10.1111/1750-3841.70265)

Tao, J., Huang, Y. J., Deng, X. S., He, J. L., Zhao, F., Xu, Q. P., Chen, J. L. & Yan, J. H. (2025). Screening dominant bacteria and establishing models to predict the growth of *Serratia* in cold fresh chicken. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19 (8), 5708–5719. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03349-9>

Toomik, E., Rood, L., Bowman, J. P. & Kocharunchitt, C. (2023). Microbial spoilage mechanisms of vacuum-packed lamb meat: A review. *International Journal of Food Microbiology*, 387, 110056. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.110056>

Vasuki, M. T, Kadirvel, V. & Narayana, G. P. (2023). Smart packaging—An overview of concepts and applications in various food industries. *Food Bioengineering*, 2, 25–41. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12038>

Wang, G., Wang, H., Han, Y., Xing, T., Ye, K., Xu, X. & Zhou, G. (2017). Evaluation of the spoilage potential of bacteria isolated from chilled chicken in vitro and in situ. *Food Microbiology*, 63, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.11.015>

Yu, Z., Peruzzi, M. F., Dumolin, C., Joossens, M. & Houf, K. (2019). Assessment of food microbiological indicators applied on poultry carcasses by culture combined MALDI-TOF MS identification and 16S rRNA amplicon sequencing. *Food Microbiology*, 82, 558–568. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.01.018>

Zhu, Y., Wang, W., Li, M., Zhang, J., Ji, L., Zhao, Z., Zhang, R., Cai, D. & Chen, L. (2022). Microbial diversity of meat products under spoilage and its controlling approaches. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1078201. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1078201>

BÖLÜM 9

GIDA AMBALAJLAMA SİSTEMLERİNDE GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİ: ANTİBAKTERİYEL MEKANİZMALAR VE GÜVENLİK BOYUTU

Şehriban OĞUZ¹

Giriş

Artan dünya nüfusu, giderek karmaşıklaşan tedarik zincirleri ve gıda kaynaklı hastalıkların halk sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik artan farkındalık, gıda güvenliği ve raf ömrünün uzatılmasını küresel ölçekte öncelikli araştırma alanları hâline getirmiştir (Newell & ark., 2010; FAO, 2019). Gıdalarda meydana gelen mikroorganizma kaynaklı kontaminasyon, bozulma süreçlerinin ve oksidatif reaksiyonların başlıca nedenleri arasında yer almakta olup, bu durum hem ürün kalitesinin düşmesine hem de ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Ray & Bhunia, 2014). Bununla birlikte, nem dengesizliği ve yetersiz ambalajlama sistemleri, gıdanın fiziksel, kimyasal ve duyuşsal özelliklerini olumsuz etkileyerek raf ömrünün kısalmasına ve gıda israfının artmasına neden olmaktadır (Robertson, 2016).

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6889-9487

Gıda ambalajları mikrobiyal kontaminasyonun yanı sıra oksijen, su buharı, ışık, ultraviyole (UV) radyasyon ve mekanik basınç gibi çevresel faktörlere karşı koruyucu bir bariyer görevi üstlenmektedir. Bu bariyer özellikleri; lipid oksidasyonu, nem transferi ve fiziksel bozulma gibi kalite kayıplarının önlenmesinde kritik öneme sahiptir. Özellikle oksijen ve su buharı geçirgenliğinin kontrolü, gıdanın duyuusal, besinsel ve mikrobiyolojik stabilitesinin korunmasında belirleyici bir faktör olarak öne çıkmaktadır (Siracusa, 2012; Tian, Decker, & Goddard, 2013; Robertson, 2016; Wang & ark., 2024a; Yang & ark., 2024).

Gıda ambalaj sistemleri, gıda güvenliğinin sağlanmasında temel bir rol oynamakta olup halk sağlığı, tüketici güveni ve toplumsal refah üzerinde dolaylı ancak güçlü bir etkilere sahiptir. Ancak geleneksel gıda ambalajlama sistemleri çoğunlukla ürünlerin fiziksel bütünlüğünü korumaya odaklanmakta olup mikrobiyal büyümeyi inhibe etme veya bozulmayı geciktirme gibi aktif fonksiyonel özellikler sunmamaktadır (Appendini & Hotchkiss, 2002; Marsh & Bugusu, 2007; Bharath & Roy, 2025). Bu sınırlamalar doğrultusunda, gıda güvenliğinin artırılması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla aktif ve akıllı ambalaj teknolojilerine yönelik araştırmalar son yıllarda önemli ölçüde hız kazanmıştır.

Akıllı ve Aktif Ambalajlama Teknolojileri

Aktif ambalajlama, gıda ile temas eden ambalaj materyallerine fonksiyonel özellikler kazandırmak amacıyla esansiyel yağlar, organik asitler, enzimler ve gümüş nanopartikülleri (AgNP'ler) gibi biyolojik veya kimyasal olarak aktif bileşenlerin entegre edilmesi esasına dayanan yenilikçi bir ambalaj yaklaşımı olarak tanımlanmaktadır (Azeredo, Rosa & Mattoso, 2017; Wang & ark., 2024b). Geleneksel pasif ambalaj sistemlerinden farklı olarak aktif ambalajlama, ambalaj-gıda-çevre etkileşimini dinamik bir yapıya dönüştürerek belirli bileşenlerin kontrollü biçimde absorbe

edilmesine ya da salınmasına olanak tanımaktadır. Bu mekanizma sayesinde oksidatif bozulma, enzimatik reaksiyonlar ve nem kaynaklı kalite kayıpları önemli ölçüde sınırlandırılabilir (Robertson, 2016; Liu & ark., 2024).

Aktif ambalajlama yaklaşımı temelinde geliştirilen modern ambalaj sistemleri, gıdanın kalite ve güvenliğini çok boyutlu olarak destekleyen yenilikçi çözümler sunmaktadır (Kerry, O’Grady & Hogan, 2006; Realini & Marcos, 2014). Aktif ambalaj sistemleri, antimikrobiyel ve antioksidan bileşenlerin kontrollü salınımı yoluyla gıdanın mikrobiyel ve kimyasal stabilitesini artırırken, bu yaklaşımla bütünleşik olarak geliştirilen akıllı ambalajlama sistemleri; sıcaklık, pH, gaz bileşimi ve mikrobiyel aktivite gibi kritik parametreleri sensör ve indikatörler aracılığıyla gerçek zamanlı olarak izleyebilmekte ve tedarik zinciri boyunca ürün kalitesine ilişkin güvenilir bilgi sağlamaktadır (Yam, Takhistov & Miltz, 2005; Robertson, 2016; Jiang & ark., 2024; Dey & ark., 2025; Liang & ark., 2025; Sani & ark., 2025).

Bu sistemler, çevresel kaynaklı kontaminantların gıda matrisine geçişini sınırlandırarak raf ömrünün uzatılmasına katkı sağlamakta; bununla birlikte tüketici-gıda etkileşimini daha şeffaf ve bilgi temelli bir yapıya dönüştürmektedir (Kerry, O’Grady & Hogan, 2006; Realini & Marcos, 2014). Bu özellikleri sayesinde aktif ve fonksiyonel ambalaj sistemleri, gıda güvenliği, izlenebilirlik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir potansiyel ortaya koymaktadır (Yam, Takhistov & Miltz, 2005; Robertson, 2016). Bu bağlamda söz konusu sistemler, geleneksel pasif ambalaj yaklaşımlarına kıyasla daha etkin koruma ve izleme mekanizmaları sunarak gıda endüstrisinde yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler arasında öne çıkmaktadır (Restuccia & ark., 2010; Vanderroost & ark., 2014).

Nanoteknoloji Tabanlı Ambalaj Materyalleri

Son yıllarda nanoteknoloji, biyopolimerler ve doğal antimikrobiyel bileşenlerin ambalaj materyallerine entegrasyonu, hem ambalajların fonksiyonel performansını artıran hem de çevresel etkileri azaltan yenilikçi yaklaşımlar olarak literatürde geniş yer bulmaktadır (Sung & ark., 2013; Realini & Marcos, 2014; Yu & ark., 2025).

Nanoteknoloji temelli ambalaj sistemleri, ambalaj materyallerinin mekanik dayanımını ve bariyer özelliklerini geliştirerek oksijen ve su buharı geçirgenliğinin kontrol altına alınmasını sağlamakta; böylece gıdanın tazeliği ve duyuşal özellikleri daha uzun süre korunabilmektedir (Duncan, 2011; Wang & ark., 2024c). Aynı zamanda ambalaj malzemelerinin kullanım ömrünün uzatılması ve malzeme tüketiminin azaltılması, sürdürülebilir ambalaj stratejileriyle uyumlu çevresel kazanımlar sunmaktadır (Siracusa & ark., 2008; Bruna & ark., 2021; Luo & ark., 2026).

Nanoteknoloji destekli antibakteriyel ambalaj uygulamalarında metal ve metal oksit nanopartiküller, yüksek yüzey alanı/hacim oranları ve reaktif yüzey yapıları sayesinde ambalaj materyallerine antibakteriyel ve fonksiyonel özellikler kazandırmaktadır. Bu nanomalzemeler, hücre zarı hasarı oluşturma, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini tetikleme ve hücreşel metabolik süreçleri baskılama gibi çok yönlü etki mekanizmalarıyla mikrobiyel gelişimi inhibe etmektedir (Rai & ark., 2009; Sebastian & ark., 2024).

Literatürde gümüş nanopartikülleri (AgNP'ler); çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂) ve bakır oksit (CuO) gibi çeşitli metal nanopartiküllerinin gıda ambalajlama uygulamalarında kullanıldığı rapor edilmekle birlikte, bu materyaller arasında AgNP'ler geniş spektrumlu antibakteriyel etkinlikleri ve düşük konsantrasyonlarda

dahi etkili olmaları nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu bağlamda AgNP'ler, nanoteknoloji tabanlı aktif ambalaj sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir fonksiyonel bileşen olarak değerlendirilmektedir (Yang & ark., 2023; Silva & ark., 2023; Yu & ark., 2024; İhsan & ark., 2024; Hidayat & ark., 2024).

Gümüş Nanopartikülleri (AgNP'ler)

Antik çağlardan bu yana gümüş iyonlarının (Ag^+), geniş bir mikroorganizma grubuna karşı etkili antimikrobiyel özellikler sergilediği bilinmektedir (Jung & ark., 2008). Tarihsel olarak, özellikle gümüş nitrat ve gümüş sülfadiazin gibi inorganik ve organometalik gümüş bileşiklerinden açığa çıkan Ag^+ iyonları; bakteri, maya ve küflerin inhibisyonunda yaygın biçimde kullanılmıştır. Bu bileşikler, hücre membran bütünlüğünün bozulması, enzimatik sistemlerin inhibe edilmesi ve nükleik asitlerle etkileşim gibi mekanizmalar aracılığıyla mikroorganizmalar üzerinde bakterisidal etki göstermektedir (Marone & ark., 1998, Gibala & ark., 2021).

Klasik gümüş tuzlarının antimikrobiyel etkinliği, özellikle tıbbi uygulamalarda (yanık tedavisi, yara örtüleri ve dezenfektanlar) uzun yıllar boyunca başarıyla kullanılmıştır (Marone & ark., 1998; Jung & ark., 2008). Bununla birlikte, son yıllarda yapılan çalışmalar, Ag^+ iyonlarının kontrollü salımının antimikrobiyel etkinliği artırırken potansiyel toksisite risklerini azaltabileceğini ortaya koymuştur (Rai, Yadav & Gade, 2009; Gibala & ark., 2021). Bu durum, gümüş iyonlarının nanoteknolojik yaklaşımlar aracılığıyla yeniden ele alınmasına zemin hazırlamış ve özellikle gümüş nanopartiküllerinin (AgNP'ler) geliştirilmesiyle birlikte gıda güvenliği, aktif ambalajlama ve biyomedikal uygulamalarda yeni kullanım alanlarının önünü açmıştır. Güncel literatür, geleneksel gümüş bazlı antimikrobiyel uygulamalardan nanoteknolojik sistemlere geçişin, sürdürülebilir antimikrobiyel stratejiler açısından

kritik bir dönüşüm olduğunu göstermektedir (Bruna & ark., 2021; Khaldoun & ark., 2025).

Gümüş nanopartikülleri (AgNP'ler), 1–100 nm boyut aralığında bulunan metalik gümüş yapılarıdır. Nano ölçeğe indirgenmeleriyle birlikte yüzey alanı/hacim oranlarında belirgin bir artış meydana gelmekte, bu durum, AgNP'lere ana kütle formuna kıyasla güçlü antimikrobiyel aktivite başta olmak üzere özgün fizikokimyasal özellikler kazandırmaktadır. Bu özellikler, AgNP'lerin aktif ve akıllı gıda ambalajlama sistemlerinde fonksiyonel bir bileşen olarak öne çıkmasını sağlamakta ve bu alandaki araştırmalarda yoğun ilgi görmelerine neden olmaktadır (Marambio-Jones & Hoek, 2010; Lasmi & ark., 2025; Okur & ark., 2025).

AgNP'lerin boyut, şekil ve yüzey özellikleri; uygulanan sentez yöntemi ve reaksiyon koşullarına bağlı olup bu parametreler antibakteriyel etkinlik üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Sarkar & ark., 2024). Antibakteriyel metal nanopartiküller arasında AgNP'ler, geniş spektrumlu antibakteriyel aktiviteleri, yüksek biyoyoumlulukları ve düşük konsantrasyonlarda dahi etkili olmaları nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir. Bu üstünlükleri sayesinde AgNP'ler; çevre teknolojileri, biyomedikal uygulamalar ve gıda ambalajlama sistemleri başta olmak üzere pek çok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Dai & ark., 2024; Ali & ark., 2025). Buna ek olarak, metal nanopartiküllerle fonksiyonelleştirilmiş akıllı ambalaj sistemleri; pH değişimleri, biyojen amin oluşumu ve UV–görünür bölge absorpsiyon özellikleri gibi kalite göstergelerindeki değişimleri algılayabilmekte ve bu sayede gıdanın tazelik ve güvenlik durumunun izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu tür sistemler, gıda güvenliği standartlarının geliştirilmesi ve tedarik zinciri boyunca ürün bütünlüğünün korunmasında stratejik bir rol üstlenmektedir (Rabee & ark., 2023; Kang & ark., 2024; Zhang & ark., 2024a).

Gümüş Nanopartiküllerinin (AgNP'ler) Sentez Yöntemleri

AgNP sentezinde kullanılan yöntemler genel olarak yukarıdan aşağı (top-down) ve aşağıdan yukarı (bottom-up) olmak üzere iki ana yaklaşım altında sınıflandırılmaktadır (Ahmed & ark., 2016).

Yukarıdan aşağı yaklaşımı, makroskopik veya mikroskopik boyuttaki metalik gümüşün fiziksel ya da mekanik işlemlerle nanoskopik boyutlara indirgenmesini esas almaktadır. Bu kapsamda bilyalı öğütme, lazer ablasyonu ve sıçratma (sputtering) gibi teknikler kullanılmaktadır (Jayaramudu & ark., 2016; Beykara & Çağlar, 2016; Alhajj & ark., 2023; Xu & ark., 2023). Bu yaklaşımın en önemli avantajı, kısa sürede nanopartikül üretimine olanak tanımasıdır. Ancak uzun işlem süreleri, yüksek enerji gereksinimi, pahalı ekipman kullanımı ve yüzey kusurlarına bağlı olarak nanopartikül özelliklerinin olumsuz etkilenmesi gibi önemli sınırlılıkları bulunmaktadır (Kumar & ark., 2024).

Aşağıdan yukarı yaklaşımında ise atomik veya moleküler düzeydeki öncül maddelerden hareketle kontrollü kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla nanopartikül sentezini hedeflemektedir (İşleyici & ark., 2019; Turan, 2025). Bu yöntem, nanopartiküllerin boyut, morfoloji, kristal yapı ve yüzey kimyasının hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanınması nedeniyle AgNP sentezinde daha yaygın olarak tercih edilmektedir (Vinnacombe-Willson & ark., 2023). Kimyasal indirgeme, yeşil sentez, sonokimyasal ve mikrodalga destekli sentez yöntemleri, aşağıdan yukarı AgNP sentezinde en sık kullanılan teknikler arasında yer almaktadır (Yavuz & Yılmaz, 2021). Aşağıdan yukarı sentez yaklaşımında metal öncül maddesi, indirgeme ajanı, stabilizatör, reaksiyon sıcaklığı ve pH gibi parametrelerin değiştirilmesiyle AgNP'lerin boyutu, dağılımı ve stabilitesi etkin biçimde kontrol edilebilmektedir.

Özellikle bitki ve mikrobiyal ekstraktlar kullanılarak gerçekleştirilen yeşil sentez yöntemleri, toksik kimyasalların kullanımını azaltması, çevre dostu olması ve elde edilen nanopartiküllerin yüksek biyouyumluluk göstermesi nedeniyle gıda ve biyomedikal uygulamalarda ön plana çıkmaktadır (Karnani & Chowdhary, Tailor & ark., 2020; Yan & ark., 2024). Bunun yanı sıra AgNP'lerin metal-organik iskeletler (MOF), grafen oksit (GO) ve MXene gibi ileri nanomalzemelerle birleştirilmesi, ortaya çıkan kompozit yapıların mekanik dayanımını, antibakteriyel etkinliğini ve fonksiyonel performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu tür hibrit sistemler, AgNP'lere özgün özellikler kazandırarak akıllı ambalajlama, sensör teknolojileri ve biyomedikal uygulamalar gibi farklı disiplinlerde kullanım alanlarının genişlemesine olanak tanımaktadır (Zheng & ark., 2024).

Gümüş Nanopartiküllerinin Antibakteriyel Etki Mekanizmaları

Gümüş nanopartiküllerinin (AgNP'lerin) antimikrobiyel ve potansiyel toksik etkilerinin altında yatan mekanizmalar henüz tam olarak aydınlatılamamış olup, bu konu literatürde halen tartışmalı bir alan olarak değerlendirilmektedir (Hajipour & ark., 2012; Ahmed & ark., 2016; Gibala & ark., 2021). Mevcut çalışmalar, Ag⁺ iyonlarının pozitif yükünün antimikrobiyel aktivite açısından kritik bir rol oynadığını ve bu yük sayesinde mikroorganizma hücre zarındaki negatif yüklü bileşenlerle güçlü elektrostatik etkileşimlerin gerçekleştiğini ortaya koymaktadır (Morones & ark., 2005; Feng & ark., 2023). Bu bağlamda, gümüşün etkili bir antimikrobiyel ajan olarak işlev gösterebilmesi için iyonize formda bulunmasının gerekli olduğu genel kabul görmektedir (Ahmed & ark., 2016).

Nitekim çok sayıda bilimsel çalışma, AgNP'lerin antibakteriyel etkinliğinin esas olarak nanopartikül yüzeyinden gerçekleşen kontrollü veya sürekli Ag⁺ iyonu salınımına dayandığını

ve bu iyonların hücrel metabolik süreçleri bozarak mikroorganizma ölümüne yol açtığını göstermektedir (Rai & ark., 2009; Xiu & ark., 2012; Khaldoun & ark., 2025).

Tamamen anaerobik koşullar altında AgNP'lerin Ag⁺ salınım kapasitesi son derece sınırlı olup, bu durum bakteriler üzerindeki inhibitör etkilerinin büyük ölçüde ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Nitekim, oksijensiz ortamlarda yüksek konsantrasyonlarda AgNP uygulanmasına rağmen bakteriyel gelişim üzerinde anlamlı bir etki gözlenmediği rapor edilmiştir. Buna karşılık aerobik koşullarda AgNP'ler, yalnızca Ag⁺ iyonlarını serbest bırakmakla kalmamakta; aynı zamanda hidrojen peroksit (H₂O₂), hidroksil radikali ($\cdot$ OH) ve süperoksit anyon radikali ($\cdot$ O₂⁻) gibi reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunu da tetiklemektedir. Ayrıca asidik çevre koşullarının Ag⁺ salınımını artırdığı ve bu durumun antibakteriyel etkinliği güçlendirdiği bildirilmektedir. Ortaya çıkan bu reaktif türler, proteinler, lipitler ve nükleik asitler gibi temel hücrel bileşenlerde ciddi hasara yol açarak hücrel metabolizmayı bozmakta ve bakteriyel hücre ölümünü indüklemektedir (Feng & ark., 2023). AgNP'lerin antibakteriyel mekanizmaları, Ag⁺ iyonu salınımı ve ROS üretimi olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmaktadır.

Tamamen anaerobik koşullar altında gümüş nanopartiküllerinin (AgNP'ler) Ag⁺ iyonu salınım kapasitesinin oldukça sınırlı olduğu ve bu nedenle antibakteriyel etkinliklerinin belirgin biçimde azaldığı bildirilmektedir. Oksijenin bulunmadığı ortamlarda, yüksek konsantrasyonlarda AgNP uygulanmasına rağmen bakteriyel büyüme ve çoğalma üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir inhibisyonun gözlenmediği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Yin & ark., 2020). Bu durum, AgNP'lerin antimikrobiyal etkilerinde oksijen varlığının kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

1. Ag⁺ İyonu Kaynaklı Antibakteriyel Etki Mekanizması

AgNP'lerin yüzeyinde gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları sonucunda açığa çıkan Ag⁺ iyonları, bakteriyel hücre zarında bulunan ve sülfhidril (–SH) grupları içeren proteinlerle güçlü etkileşimler kurabilmektedir. Sert–yumuşak asit–baz (HSAB) teorisine göre sülfhidril grupları yumuşak baz, Ag⁺ iyonları ise yumuşak asit karakteri göstermekte olup, bu durum Ag⁺'nin protein ve enzimlere yüksek afiniteyle bağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlanma, proteinlerin fonksiyonel yapısının bozulmasına ve enzimatik aktivitelerin inhibe edilmesine yol açarak hücresel bütünlüğün zarar görmesine neden olmaktadır (Morozova, 2021).

Bunun yanı sıra Ag⁺ iyonlarının amino ve fosfat gruplarıyla etkileşime girerek DNA hasarına ve protein inaktivasyonuna neden olduğu bildirilmektedir. Bu etkileşimler sonucunda hücre zarının geçirgenliği artmakta, hücre içi ATP tüketimi yükselmekte ve solunum zincirinde görev alan proteinlerin inhibisyonu nedeniyle enerji metabolizması ciddi biçimde baskılanmaktadır. Ag⁺ iyonlarının ayrıca hücre büzülmesi, DNA yoğunlaşması ve kromatin yapısının bozulması gibi geri dönüşü olmayan hücresel değişikliklere yol açarak bakteriyel hücre üzerinde letal etki oluşturduğu ifade edilmektedir (Pryshchepa, Pomastowski & Buszewski, 2020; Li & ark., 2023).

2. ROS (Reaktif Oksijen Türleri) Kaynaklı Antibakteriyel Mekanizma

Aerobik koşullar altında AgNP'lerin oksidasyonu sırasında Ag⁺ iyonlarının açığa çıkmasıyla eş zamanlı olarak ROS üretimi gerçekleşmektedir. Ag⁺ iyonlarının tek başına da ROS oluşumunu indükleyebildiği, ancak bu etkinin AgNP'lere kıyasla oldukça sınırlı olduğu bildirilmektedir (Falco & ark., 2020). AgNP'lerin, bakteriyel hücrelerde oksidatif stres yanıtı, süperoksit radikali temizleme mekanizmaları ve hücresel redoks dengesine ilişkin gen

ekspresyonunu belirgin şekilde artırdığı; buna karşın yalnızca gümüş iyonlarının bu tür düzenleyici etkilere sahip olmadığı ortaya konmuştur (Zhang & ark., 2024b).

AgNP'lerin varlığında, akonitaz ve süksinat dehidrogenaz gibi solunum zincirinde görev alan temel enzimlerin hızlı bir şekilde inaktive olduğu ve demir-kükürt (Fe-S) kümelerinin ROS tarafından bozulduğu bildirilmektedir. Bu süreçte açığa çıkan Fe^{3+} iyonları, Fenton reaksiyonlarını tetikleyerek DNA ve lipitlerde ileri düzey oksidatif hasara neden olmaktadır (Wen & ark., 2024). Ayrıca ROS'un bakteriyel hücre zarına zarar vererek hücre içeriğinin sızmasına yol açtığı, bu durumun AgNP'lerin hücre içine daha kolay nüfuz etmesini sağlayarak ROS üretimini daha da artırdığı belirtilmektedir (Wang & ark., 2023).

Denitrifikasyon yeteneğine sahip bakterilerde ise ROS seviyesindeki artışın, denitrifikasyon enzimlerinin aktivitesini baskıladığı ve bu durumun hücresel oksidatif stresin şiddetlenmesine yol açarak mikrobiyal morfolojinin bozulmasıyla sonuçlandığı rapor edilmiştir (Xiang & ark., 2024). Bu bulgular, AgNP'lerin antibakteriyel etkisinin çok boyutlu ve sinerjik mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Gümüş Nanopartiküllerinin Gıda Ambalajlamadaki Güvenliği

Gümüş nanopartiküllerinin (AgNP'ler) gıda ambalajlama sistemlerinde kullanımı, geniş spektrumlu antimikrobiyel etkinlikleri sayesinde mikrobiyal gelişimin baskılanması ve dolayısıyla gıdaların raf ömrünün uzatılması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak, AgNP'lerin ambalaj materyalinden gıda matriksine migrasyonu, insan sağlığı ve çevresel güvenlik açısından dikkatle ele alınması gereken kritik bir konudur. Nanopartikül boyutundaki gümüşün biyolojik sistemlerle etkileşimi, çözünür gümüş tuzlarından farklı toksikokinetik özellikler sergileyebilmekte; bu durum maruziyet ve risk değerlendirme

süreçlerini daha karmaşık hâle getirmektedir (Marambio-Jones & Hoek, 2010; Istiqola & Syafiuddin, 2020; EFSA, 2021).

AgNP'lerin gıdaya migrasyonu; nanopartikül boyutu, yüzey modifikasyonu, stabilizatör veya kaplama ajanları, ambalaj polimerinin kimyasal yapısı, temas süresi, sıcaklık ve gıdanın pH ile nem içeriği gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Echegoyen & Nerín, 2013; Ahmad & ark., 2021). Özellikle asidik ve yüksek nem içeren gıda sistemlerinde Ag^+ iyonlarının salınımının arttığı ve bu iyonların gıda matriksinde birikebildiği bildirilmektedir. Bu durum, uzun süreli ve tekrarlayan maruziyet senaryolarında potansiyel toksik etkilerin kapsamlı şekilde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Toksikolojik çalışmalar, AgNP'lerin gastrointestinal sistemde sınırlı ancak ölçülebilir düzeyde emilebildiğini ve sistemik dolaşıma geçerek belirli dokularda birikebildiğini ortaya koymaktadır. Düşük konsantrasyonlarda akut toksisiteye dair belirgin bir bulgu rapor edilmemiş olsa da yüksek doz ve kronik maruziyet koşullarında oksidatif stres, inflamatuvar yanıtların uyarılması ve hücrel hasar riskinin artabileceği bildirilmektedir (Yen & ark., 2009; Park & ark., 2010; Mao & ark., 2018). Özellikle karaciğer, böbrek ve intestinal epitel dokularında birikim potansiyeli, AgNP'lerin gıda ambalajlarında kullanımına yönelik güvenli maruziyet sınırlarının belirlenmesini gerekli kılmaktadır.

Bu çerçevede, European Food Safety Authority (EFSA) ve Food and Drug Administration (FDA) gibi uluslararası düzenleyici otoriteler, nanomalzemelerin gıda ile temas eden materyallerde kullanımına ilişkin risk değerlendirme esaslarını ayrıntılı biçimde tanımlamıştır. EFSA, gıda ambalajlarında kullanılan nanomalzemeler için spesifik migrasyon testleri, kapsamlı toksikolojik veri setleri ve maruziyet değerlendirmelerini zorunlu kılmakta; her bir nanomalzemenin vaka bazlı olarak değerlendirilmesini önermektedir (EFSA, 2021). Güncel mevzuat

kapsamında AgNP'ler için evrensel bir maksimum migrasyon limiti tanımlanmamış olup, risk temelli ve ürün özelinde bir değerlendirme yaklaşımı benimsenmektedir (Trotta & ark., 2023; Luo & ark., 2026).

Sürdürülebilirlik ve tüketici güveni perspektifinden bakıldığında, AgNP içeren ambalaj sistemlerinin çevresel kaderi ve geri dönüşüm süreçleri de önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Atık ambalajlardan çevreye salınan nanopartiküllerin sucul ve toprak ekosistemleri üzerinde potansiyel ekotoksik etkilere yol açabileceği bildirilmiştir. Bu bağlamda, biyopolimer bazlı, migrasyonu sınırlandırılmış ve kontrollü salım özelliklerine sahip AgNP sistemlerinin geliştirilmesi hem insan sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından daha güvenli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, AgNP içeren gıda ambalajlarının tasarımında antimikrobiyel etkinlik ile tüketici ve çevre güvenliği arasında optimal bir denge gözetilmesi temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Piccinno & ark., 2012; Trotta & ark., 2023)

Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Gıda ambalajlama sistemlerinde AgNP kullanımının güvenli ve sürdürülebilir biçimde yaygınlaştırılabilmesi için migrasyon davranışlarının detaylı biçimde karakterize edilmesi, uzun dönem toksikolojik çalışmaların artırılması ve uluslararası regülasyonlarla uyumlu tasarım stratejilerinin benimsenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda geliştirilecek bilimsel temelli yaklaşımlar, AgNP'lerin aktif ve akıllı ambalajlama teknolojilerinde güvenli kullanımına yönelik önemli bir yol haritası sunacaktır.

Kaynakça

Ahmad, S. S., Yousuf, O., Islam, R. U. & Younis, K. (2021). Silver nanoparticles as an active packaging ingredient and its toxicity. *Packaging Technology and Science*, 34 (11-12), 653-663. <https://doi.org/10.1002/pts.2603>

Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L. & Ikram, S. (2016). A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise. *Journal of Advanced Research*, 7 (1), 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.02.007>

Alhajj, M., Abd Aziz, M. S., Salim, A. A., Sharma, S., Kamaruddin, W. H. A. & Ghoshal, S. K. (2023). Customization of structure, morphology and optical characteristics of silver and copper nanoparticles: Role of laser fluence tuning. *Applied Surface Science*, 614, 156176. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.156176>

Ali, S., Bahadur, A., Hassan, A., Ahmad, S., Shah, W. & Iqbal, S. (2025). Optimized Silver Nanostructures for Enhanced Antibacterial Potential: Recent Trends and Challenges in the Development of Metallo-Antimicrobials. *Chemical Engineering Journal*, 507, 160470. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160470>

Appendini, P. & Hotchkiss, J. H. (2002). Review of Antimicrobial Food Packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3 (2), 113-126. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(02\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(02)00012-7)

Azeredo, H. M. C., Rosa, M. F. & Mattoso, L. H. C. (2019). Nanocellulose in Bio-based Food Packaging Applications. *Industrial Crops and Products*, 97, 664–671. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.013>

Beykara, M. & Çağlar, A. (2016). Bitkisel Özütlere Kullanılarak Gümüş-Nanopartikül (AgNP) Sentezlenmesi ve Antimikrobiyal

Etkinlikleri Üzerine Bir Araştırma. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 631-641.

Bharath, K. R. & Roy, S. (2025). The Latest Research Progress of Active and Intelligent Packaging. In J. Ju & F. Zhao (Eds.), *Edible Film and Coatings: Innovative Applications for Packaging and Food Preservation* (1st ed., 396). Boca Raton: CRC Press

Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P. & Caro, N. (2021). Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22 (13), 7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>

Dai, Q., Jia, R., Li, H., Yang, J. & Z. Qin. (2024). Preparation and Application of Sustained-Release Antibacterial Alginate Hydrogels by Loading Plant-Mediated Silver Nanoparticles. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12, 1388-1404. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c04907>

Dey, M., Bera, S., Tyagi, P. & Pal, L. (2025). Mechanisms and strategic prospects of cannabinoids use: Potential applications in antimicrobial food packaging-A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24, e70113. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70113>

Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 363 (1), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.07.017>

Echegoyen, Y. & Nerín, C. (2013). Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers. *Food and Chemical Toxicology*, 62, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.08.014>

European Food Safety Authority (EFSA). (2021). Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain.

EFSA Journal, 19 (8), e06768.
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6768>

Falco, W. F., Scherer, M. D., Oliveira, S. L., Wender, H., Colbeck, I., Lawson, T. & Caires, A. R. (2020). Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange. *Science of the Total Environment*, 701, 134816.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134816>

FAO, (2019). The future of food safety: Transforming knowledge into action for people, economies and the environment. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Feng, L., Liu, Y., Chen, Y., Xiang, Q., Huang, Y., Liu, Z., Xue, W. & Guo, R. (2023). Injectable Antibacterial Hydrogel with Asiaticoside-Loaded Liposomes and Ultrafine Silver Nanosilver Particles Promotes Healing of Burn-Infected Wounds. *Advanced Healthcare Materials*, 12, 2203201. <https://doi.org/10.1002/adhm.202203201>

Gibała, A., Żeliszewska, P., Gosiewski, T., Krawczyk, A., Duraczyńska, D., Szaleniec, J., Szaleniec, M. & Oćwieja, M. (2021). Antibacterial and antifungal properties of silver nanoparticles—effect of a surface-stabilizing agent. *Biomolecules*, 11 (10), 1481. <https://doi.org/10.3390/biom11101481>

Hajipour, M. J., Fromm, K. M., Ashkarran, A. A., de Aberasturi, D. J., de Larramendi, I. R., Rojo, T., Rojo, T., Serpooshan, V., Parak, W. J. & Mahmoudi, M. (2012). Antibacterial properties of nanoparticles. *Trends in Biotechnology*, 30 (10), 499-511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.06.004>

Hidayat, R., Fadillah, G., Ohira, S.-I., Fajarwati, F. I., Setyorini, D. A. & Saputra, A. (2024). Facile green synthesis of Ag-doped TiO₂ nanoparticles using maple leaf for bisphenol-A degradation and its

antibacterial properties. *Materials Today Sustainability*, 26, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100752>

Ihsan, S., Munir, H., Meng, Z., Tayyab, M., Zeeshan, N., Rehman, A., Nadeem, S. & Irfan, M. (2024). Tragacanth gum-based copper oxide nanoparticles: Comprehensive characterization, antibiofilm, antimicrobial and photocatalytic potentials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 268, 131600. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131600>

Istiqola, A. & Syafiuddin, A. (2020). A review of silver nanoparticles in food packaging technologies: Regulation, methods, properties, migration, and future challenges. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 67 (11), 1942-1956. <https://doi.org/10.1002/jccs.202000179>

İşleyici, Ö., Çakmak, T., Sancak, Y. C., Elçek, R. & Tuncay, R. M. (2019). Gıda ambalajlarında nanoteknoloji uygulamaları. *Ereğli Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi, Mart*, 9-10.

Jayaramudu, T., Raghavendra, G. M., Varaprasad, K., Reddy, G. V. S., Reddy, A. B., Sudhakar, K. & Sadiku, E. R. (2016). Preparation and characterization of poly (ethylene glycol) stabilized nano silver particles by a mechanochemical assisted ball mill process. *Journal of Applied Polymer Science*, 133 (7), 43027. <https://doi.org/10.1002/app.43027>

Jiang, H., Zhao, S., Li, Z., Chen, L., Mo, H. & Liu, X. (2024). Swan-feathers inspired smart-responsive sustainable carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol based food packaging film for robustly integrated intelligent and active packaging. *Nano Today*, 56, 102272. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2024.102272>

Jung, W. K., Koo, H. C., Kim, K. W., Shin, S., Kim, S. H. & Park, Y. H. (2008). Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Applied*

and *Environmental Microbiology*, 74 (7), 2171-2178.
<https://doi.org/10.1128/AEM.02001-07>

Kang, L., Liang, Q., Liu, Y., Rashid, A., Qayum, A., Zhou, C., Han, X., Ren, X., Chi, Z., Chi, R. & Ma, H. (2024). Preparation technology and preservation mechanism of novel Ag NPs-loaded ZIF-67 packaging film. *Food Packaging and Shelf Life*, 45, 101338.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101338>

Karnani, R. L. & Chowdhary, A. (2013). Biosynthesis of silver nanoparticle by eco-friendly method. *Indian Journal of Nanoscience*, 1 (1), 25-31.

Kerry, J. P., O'Grady, M. N. & Hogan, S. A. (2006). Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat Science*, 74 (1), 113-130. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.024>

Khaldoun, K., Khizar, S., Saidi-Besbes, S., Zine, N., Errachid, A. & Elaissari, A. (2025). Synthesis of silver nanoparticles as an antimicrobial mediator. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11 (2), 274-293.

Kumar, P., Thakur, N., Kumar, K., Kumar, S., Dutt, A., Thakur, V. K., Gutiérrez-Rodelo, C., Thakur, P., Navarrete, A. & Thakur, N. (2024). Catalyzing innovation: Exploring iron oxide nanoparticles-Origins, advancements, and future application horizons. *Coordination Chemistry Reviews*, 507, 215750.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215750>

Lasmi, F., Hamitouche, H., Laribi-Habchi, H., Benguerba, Y. & Chafai, N. (2025). Silver Nanoparticles (AgNPs), Methods of Synthesis, Characterization, and Their Application: A Review. *Plasmonics*, 20, 9455-9488. <https://doi.org/10.1007/s11468-025-02894-9>

Li, P.-P., Y. Zhang, C. Wang, Wang, S.-J., Yan, W.-Q., Xiao, D.-X., Kang, J., Yang, D.-Z., Wu, H.-H. & Dong, A. (2023). Promotion of Reactive Oxygen Species Activated by Nanosilver Surface Engineering for Resistant Bacteria-Infected Skin Tissue Therapy. *Rare Metals*, 42, 4167-4183. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02481-z>

Liang, S., Wang, X., Wei, C., Xie, L. & Dang, X. (2025). Engineering a natural multifunctional biomass-based composite nanosystem for active smart packaging and colorimetric labels. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13, 3066-3077. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07279>

Liu, S., Qiao, S., Zhu, J., Yang, Y., Chen, H., Dai, H., Zhu, H., Yu, Y., Ma, L., Zhang, Y. & Wang, H. (2024). Enhanced Barrier and Antioxidant Properties of Gelatin Films by Structural-Colored Bioactive Materials for Food Packaging. *Food Hydrocolloids*, 150, 109744. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109744>

Luo, T., Yao, T., Zhan, Z., Gan, B., Wu, X. & Xu, H. (2026). Recent Progress on Silver-Based Antibacterial Food Packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 25 (1), e70366. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70366>

Mao, B. H., Chen, Z. Y., Wang, Y. J. & Yan, S. J. (2018). Silver nanoparticles have lethal and sublethal adverse effects on development and longevity by inducing ROS-mediated stress responses. *Scientific Reports*, 8, 2445. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20728-z>

Marambio-Jones, C. & Hoek, E. M. (2010). A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *Journal of Nanoparticle Research*, 12 (5), 1531-1551. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9900-y>

Marone, P., Monzillo, V., Perversi, L. & Carretto, E. (1998). Comparative in vitro activity of silver sulfadiazine, alone and in combination with cerium nitrate, against staphylococci and Gram-negative bacteria. *Journal of Chemotherapy*, 10 (1), 17-21. <https://doi.org/10.1179/joc.1998.10.1.17>

Marsh, K. & Bugusu, B. (2007). Food packaging-roles, materials, and environmental issues. *Journal of Food Science*, 72 (3), R39-R55.

Morones, J. R., Elechiguerra, J. L., Camacho, A., Holt, K., Kouri, J. B., Ramírez, J. T. & Yacaman, M. J. (2005). The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 16 (10), 2346. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/059>

Morozova, O. V. (2021). Silver Nanostructures: Limited Sensitivity of Detection, Toxicity and Anti-Inflammation Effects. *International Journal of Molecular Sciences*, 22 (18), 9928. <https://doi.org/10.3390/ijms22189928>

Newell, D. G., Koopmans, M., Verhoef, L., Duizer, E., Aidara-Kane, A., Sprong, H., Opsteegh, M., Langelaar, M., Threfall, J., Scheutz, F., van der Giessen, J. & Kruse, H. (2010). Food-borne Diseases - The Challenges of 20 years Ago Still Persist While New Ones Continue to Emerge. *International Journal of Food Microbiology*, 139 (Suppl. 1), S3–S15. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.01.021>

Okur, E. E., Eker, F., Akdaşçi, E., Bechelany, M. & Karav, S. (2025). Comprehensive Review of Silver Nanoparticles in Food Packaging Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 26 (20), 9842. <https://doi.org/10.3390/ijms26209842>

Park, E. J., Yi, J., Kim, Y., Choi, K. & Park, K. (2010). Silver nanoparticles induce cytotoxicity by a Trojan-horse type

mechanism. *Toxicology in Vitro*, 24 (3), 872-878.
<https://doi.org/10.1016/j.tiv.2009.12.001>

Piccinno, F., Gottschalk, F., Seeger, S. & Nowack, B. (2012). Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world. *Journal of Nanoparticle Research*, 14 (9), 1109. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1109-9>

Pryshchepa, O., Pomastowski, P. & Buszewski, B. (2020). Silver Nanoparticles: Synthesis, Investigation Techniques, and Properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102246. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102246>

Rabee, M., Elmogy, S. A., Morsy, M., Lawandy, S., Zahran, M. A. H. & Moustafa, H. (2023). Biosynthesis of MgO nanoparticles and their impact on the properties of PVA/gelatin nanocomposites for smart food packaging applications. *ACS Applied Bio Materials*, 6, 5037-5051. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00723>

Rai, M., Yadav, A. & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27 (1), 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>

Ray, B. & Bhunia, A. (2014). *Fundamental Food Microbiology* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press

Realini, C. E. & Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science*, 98 (3), 404-419. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.031>

Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., Curcio, M., Iemma, F., Puoci, F., Vinci, G. & Picci, N. (2010). New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry applications. *Food Control*, 21 (11), 1425-1435. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.04.028>

Robertson, G. L. (2016). *Food Packaging: Principles and Practice* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press

Sani, M. A, Khezerlou, A., Rezvani-Ghalhari, M., McClements, D. J. & Varma, R. S. (2025). Advanced carbon-based nanomaterials: Application in the development of multifunctional next-generation food packaging materials. *Advances in Colloid and Interface Science*, 339, 103422. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103422>

Sarkar, J., Naskar, A., Nath, A., Gangopadhyay, B., Tarafdar, E., Das, D., Chakraborty, S., Chattopadhyay, D. & Acharya, K. (2024). Innovative utilization of harvested mushroom substrate for green synthesis of silver nanoparticles: A Multi-Response optimization approach. *Environmental Research*, 248, 118297. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118297>

Sebastian, S., Priya, Rohila, Y., Ansari, A., Prakash, S., Kumar, A. & Gupta M. K. (2024). Environmentally benign self-assembled biopolymer–peptoid nanosilver composite hybrid gel beads via ion-crosslinking for antimicrobial and catalytic applications. *Applied Materials Today*, 41, 102512. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102512>

Silva, F. A. G. S., Carvalho, M., de Carvalho, T. B., Gama, M., Pocas, F. & Teixeira, P. (2023). Antimicrobial Activity of In Situ Bacterial Nanocellulose–zinc Oxide Composites for Food Packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 40, 101201. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101201>

Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S. & Dalla Rosa, M. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 19 (12), 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>

Siracusa, V. (2012). Food Packaging Permeability Behaviour: A Report. *International Journal of Polymer Science*, 302029. <https://doi.org/10.1155/2012/302029>

Sung, S. Y., Sin, L. T., Tee, T. T., Bee, S. T., Rahmat, A. R., Rahman, W. A. W. A. & Tan, A. C. (2013). Antimicrobial agents for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 33 (2), 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.001>

Tailor, G., Yadav, B. L., Chaudhary, J., Joshi, M. & Suvalka, C. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles using *Ocimum canum* and their antibacterial activity. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 24, 100848. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100848>

Tian, F., Decker, E. A. & Goddard, J. M. (2013). Controlling Lipid Oxidation of Food by Active Packaging Technologies. *Food Function*, 4 (5), 669-680. <https://doi.org/10.1039/C3FO30360H>

Trotta, F., Da Silva, S., Massironi, A., Mirpoor, S. F., Lignou, S., Ghawi, S. K. & Charalampopoulos, D. (2023). Silver bionanocomposites as active food packaging: Recent advances & future trends tackling the food waste crisis. *Polymers*, 15 (21), 4243. <https://doi.org/10.3390/polym15214243>

Turan, F. (2025). Nanopartiküllerin İlaç Dağıtımındaki Rolü ve Hücre Hatları ile Toksisite Değerlendirme Yöntemleri. *Nanopartiküller: Biyolojik Aktiviteleri ve Toksisitesi ile İlgili Güncel Yaklaşımlar-I*, 265-285. <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.15169753>

Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F. & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39 (1), 47-62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>

Vinnacombe-Willson, G. A., Conti, Y., Stefancu, A., Weiss, P. S., Cortes, E. & Scarabelli, L. (2023). Direct bottom-up in situ growth: A paradigm shift for studies in wet-chemical synthesis of gold nanoparticles. *Chemical Reviews*, 123, 8488-8529. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00914>

Wang, X., Chen, Y.-P., Liu, S.-Y., Guo, J.-S., Fang, F. & Yan, P. (2023). The Effect of Silver Nanoparticles on Aerobic Denitrifying Bacteria During Biological Nitrogen Removal: A New Perspective Based on Morphological Effects. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144538. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144538>

Wang, F., Xu, Z., Chen, L., Qiao, Z., Hu, Y., Fan, X., Liu, Y., Kang, Z., Huang, F., Han, M., Yang, H. & Feng, X. (2024a). Super Absorbent Resilience Antibacterial Aerogel with Curcumin for Fresh Pork Preservation. *Food Control*, 159, 110289. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110289>

Wang, J.-D., Yang, S.-L., Liu, G.-S., Zhou, Q., Fu, L.-N., Gu, Q., Cai, Z.-C, Zhang, S. & Fu, Y.-J (2024b). A Degradable Multifunctional Packaging Based on Chitosan/Silk Fibroin via Incorporating Cellulose Nanocrystals-Stabilized Cinnamon Essential Oil Pickering Emulsion. *Food Hydrocolloids*, 153, 109978. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109978>

Wang, K., Yang, X., Liang, J., Rong, Y., Zhao, W., Ding, J., Liu, Y. & Liu, Q. (2024c). Preparation, characterization, antimicrobial evaluation, and grape preservation applications of polyvinyl alcohol/gelatin composite films containing zinc oxide@quaternized chitosan nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 277, 134527. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134527>

Wen, Y., Chen, W., Wu, R., Guo, J., Liu, X., Shi, B., Zhang, C., Wu, L., Zheng, Y., Liu, A. & Lin, L. (2024). Chitosan-stabilized PtAu

nanoparticles with multienzyme-like activity for mixed bacteria infection wound healing and insights into its antibacterial mechanism. *Small Structures*, 5 (6), 2300553. <https://doi.org/10.1002/sstr.202300553>

Xiang, Z., Xu, Y., Dong, W., Zhao, Y. & Chen, X. (2024). Effects of Silver Nanoparticles on Nitrogen Removal by the Heterotrophic Nitrification- Aerobic Denitrification Bacteria *Zobellella* sp. B307 and Their Toxicity Mechanisms. *Marine Pollution Bulletin*, 203, 116381. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116381>

Xiu, Z. M., Zhang, Q. B., Puppala, H. L., Colvin, V. L. & Alvarez, P. J. J. (2012). Negligible particle-specific antibacterial activity of silver nanoparticles. *Nano Letters*, 12 (8), 4271-4275. <https://doi.org/10.1021/nl301934w>

Xu, Y., Zhang, J., Liang, F., Yin, M. & He, M. (2023). Investigation of magnetron sputtered nano-silver coating on titanium surface with micro-nanostructure. *Surfaces and Interfaces*, 38, 102770. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102770>

Yam, K. L., Takhistov, P. T. & Miltz, J. (2005). Intelligent packaging: Concepts and applications. *Journal of Food Science*, 70 (1), R1–R10. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb09052.x>

Yan, Y., Li, G., Su, M. & Liang, H. (2024). *Scutellaria baicalensis* polysaccharide-mediated green synthesis of smaller silver nanoparticles with enhanced antimicrobial and antibiofilm activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16, 45289-45306. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c07770>

Yang, D., Liu, Q., Gao, Y., Wan, S., Meng, F., Weng, W. & Zhang, Y (2023). Characterization of Silver Nanoparticles Loaded Chitosan/polyvinyl Alcohol Antibacterial Films for Food Packaging. *Food Hydrocolloids*, 136, 108305. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108305>

Yang, W., Ning, Y., Ren, Z., Xu, S., Li, J. & Wang, L. (2024). Fabricating Anti-Ultraviolet and Antibacterial Films with Lower Water Solubility from Chitosan, Glycerol and Aloe Emodin for Pork Preservation. *Food Hydrocolloids*, 153 (110030). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110030>

Yavuz, İ. & Yılmaz, E. Ş. (2021). Biyolojik Sistemli Nanopartiküller. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 2 (1), 93-108. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4843592>

Yen, H. J., Hsu, S. H. & Tsai, C. L. (2009). Cytotoxicity and immunological response of gold and silver nanoparticles of different sizes. *Small*, 5 (13), 1553-1561. <https://doi.org/10.1002/sml.200900126>

Yin, I. X., Zhang, J., Zhao, I. S., Mei, M. L., Li, Q. & Chu, C. H. (2020). The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. *International Journal of Nanomedicine*, 15, 2555-2562. <https://doi.org/10.2147/IJN.S246764>

Yu, Y., Zhou, J., Chen, Q., Xie, F., Zhang, D., He, Z., Chen, S. & Cai, J. (2024). Self-reinforced multifunctional starch nanocomposite film for litchi fruit postharvest preservation. *Chemical Engineering Journal*, 486, 150262. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150262>

Yu, W., Wang, G., Chen, H., Mu, H., Niu, B., Han, Y., Wang, L., Chen, H. & Gao, H. (2025). Sustained antimicrobial polymer film from γ -CD-MOF humidity switch for fruit and vegetable preservation. *Food Chemistry*, 479, 143856. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143856>

Zhang, L., Yu, D., Gu, Y., Xu, Y., Jiang, Q., Yang, F., Regenstein, J. M., Yu, D. & Xia, W. (2024a). Green Halochromic Smart and Active Packaging Materials Based on Chitosan Film Loading Nanoparticles: Functionality, Physicochemical Properties and

Application. *Food Hydrocolloids*, 150, 109667.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109667>

Zhang, Q., Zhou, H., Jiang, P., Wu, L. & Xiao, X. (2024b). Silver Nanoparticles Facilitate Phage-Borne Resistance Gene Transfer in Planktonic and Microplastic-Attached Bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 469, 133942.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133942>

Zheng, M., Wang, X., Zhang, J., Yue, O., Zhang, J., Bai, Z., Jiang, H., Wu, J., Wen, L. & Liu, X. (2024). Nature-Skin-Derived Multi-Responsive E-Skin as On-Demand Drug-Delivery System Facilitated Melanoma Postoperative Therapy. *Journal of Materials Science & Technology*, 188, 155-168.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.12.010>

BÖLÜM 10

ZEYTİN ATIKLARININ BİYOBOZUNUR AMBALAJLARA DÖNÜŞMESİ

1. FULYA HARP ÇELİK ¹

Giriş

İnsanlık tarihinin en eski ve stratejik tarımsal ürünlerinden biri olan zeytin, Akdeniz havzası başta olmak üzere Asya'nın belirli bölgelerine özgü olan *Olea europaea L.* ağacının meyvesidir. Günümüzde küresel gıda endüstrisinin ve bitkisel yağ üretiminin temel taşlarından biri haline gelen bu meyve, morfolojik olarak genellikle oval bir yapı sergilemekte; içerdiği besinsel öğeler ve biyoaktif bileşenler sayesinde hem gıda hem de farmakoloji alanında büyük önem taşımaktadır.

Zeytin meyvesinin biyokimyasal matrisi; karbonhidratlar, elzem vitaminler ve minerallerin yanı sıra yüksek konsantrasyonda fenolik bileşikler ve doğal pigmentlerden oluşmaktadır. Meyveyi diğer pek çok meyve türünden ayıran en temel karakteristik özellik ise yüksek lipid içeriğidir. Bu lipid profilinin ana gövdesini, başta oleik asit olmak üzere tekli doymamış yağ asitleri oluşturmaktadır.

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Orcid: 0000-0003-1217-5951

Doğal haliyle içerdği glikozitler (özellikle oleuropein) nedeniyle acı bir tada sahip olan zeytin, uygun fermantasyon ve işlem teknikleriyle bu acılığın giderilmesinin ardından sofraya zeytini olarak tüketilmekte veya doğrudan yağ üretimi için işlenmektedir.

Zeytinyağının kompleks yapısı iki ana fraksiyon üzerinden analiz edilmektedir. Toplam bileşimin yaklaşık %98–99'unu oluşturan triasilgliseroller, ürünün temel yağ asidi profilini belirlerken; geri kalan %1–2'lik küçük fakat kritik kısmı "minör bileşenler" oluşturmaktadır. Bu minör grup; antioksidan kapasiteden sorumlu fenolik bileşikler ve tokoferoller (E vitamini), kolesterol metabolizmasında rol oynayan fitosteroller, karakteristik rengi veren pigmentler (klorofiller, karotenoidler) ve duyuşsal kimliği oluşturan uçucu aroma bileşenlerinden meydana gelmektedir. Bu zengin ve dengeli bileşim, zeytinyağını sadece bir gıda maddesi olmanın ötesine taşıyarak fonksiyonel bir besin kaynağı haline getirmektedir.

Yağ üretiminde oluşan atıklar halihazırda hayvan yemi veya biyoyakıt kaynağı olarak biyokütle olarak başarıyla kullanılmaktadır (Fernandez & ark. 2021; Arulprakasajothi & ark., 2020). Bununla birlikte, bu çözümler henüz beklenen etkileri göstermemiştir.

Zeytinyağı esas olarak Avrupa'da üretilmektedir. 2005-2018 yılları arasında dünya zeytin üretimi yaklaşık 2,86 milyon tondur. Önemli bir gerçek şu ki, bu miktarda yağın hazırlanması 14,3 ila 17,6 milyon ton zeytinin kullanılmasını gerektiriyor ve bunun yaklaşık %30'u posa şeklinde atık oluşturuyor (Fernandez & ark., 2021; Hazreen-Nita & ark., 2022). Posa, yüksek su içeriğine sahip kararsız bir malzemedir (Chen & ark. 2020; Caldeira & ark. 2020). Bununla birlikte, omega-3 ve -6 yağ asitleri, mineral bileşikler, vitaminler, karbonhidratlar, polifenoller ve lif dahil olmak üzere birçok değerli bileşen açısından zengin bir kaynaktır (Pattnaik & ark., 2021). Yağ üretiminde oluşan atıklar halihazırda hayvan yemi veya biyoyakıt kaynağı olarak biyokütle olarak başarıyla kullanılmaktadır (Fernandez & ark., 2021; Arulprakasajothi, & ark., 2020). Bununla

birlikte, bu çözümler henüz beklenen etkileri göstermemiştir. Zeytin atıklarının yetersiz yönetimi sadece yerel bir sorun değil, aynı zamanda küresel bir sorundur. Nispeten kısa bir süre içinde üretilen büyük miktardaki posa, işleme tesisleri için önemli bir unsurdur (Arulprakasajothi & ark., 2020; Meena, & ark., 2020).

Son yıllarda yapılan araştırmalar; yer fıstığı kabuğu, kahve, şarap ve zeytinyağı endüstrisi gibi tarımsal atıklardan elde edilen özütlerin, "aktif ambalaj" teknolojisinde devrim niteliğinde bir rol oynadığını göstermektedir. Bu yeni nesil yöntemler, gıdaların raf ömrünü uzatmak, kalitesini izlemek ve korumak adına yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır (Serrano-León & ark., 2018; Vidal & ark., 2022).

Gıda ambalajları, son yıllarda bir dizi nedenden dolayı önemli değişikliklere uğramıştır; bunlar sadece çevreyi korumakla kalmayıp, enerji tasarrufu sağlamak, üretim maliyetlerini düşürmek, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve duyuşal ve besleyici kalitelerini ve tüketicilerin sağlığını korumakla da ilgilidir (Azevedo & ark.,2022).

Gıda ambalajları; çevresel koruma, enerji tasarrufu, düşük üretim maliyeti ve tüketici sağlığının korunması gibi motivasyonlarla büyük bir değişim geçirmektedir (Azevedo & ark., 2022). Geleneksel plastik ambalajlardan sızan zararlı kimyasalların endokrin sistem üzerindeki bozucu etkileri ve vücutta birikme riskleri, biyolojik olarak parçalanabilen alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Halden, 2010).

Potansiyel olarak, biyolojik olarak parçalanabilir bir ambalaj polilaktik asit (PLA), polihidroksialkonatlar (PHA'lar), polyesterler ve nişasta karışımlarından yapılabilir (Mangaraj,2019). Son zamanlarda, selüloz türevli malzemelere olan ilgi artmıştır. Suda çözünebilen anyonik bir polisakkarit olan karboksimetil selüloz (CMC), mekanik mukavemet, bariyer özellikleri, şeffaflık ve termal kararlılık gibi film oluşturma özellikleri nedeniyle aktif ambalaj

geliştirme için potansiyel bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır (Ramakrishnan & ark., 2024; Yaradoddi & ark. 2020). CMC filmlerine yan ürünlerin veya sulu bitki özlerinin eklenmesi, gaz geçirgenliğini azaltabilir ve ayrıca çeşitli gıdalarda, özellikle de yüksek miktarda çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA'lar) içerenlerde lipid oksidasyonunu başlatan ışığa karşı koruma sağlayabilir (Sahraee & ark., 2019).

Bu doğrultuda polilaktik asit (PLA), polihidroksialkonatlar (PHA), polyesterler ve nişasta türevli biyopolimerler ambalaj sektöründe öne çıkmaktadır (Mangaraj, 2019). Özellikle suda çözüneabilen anyonik bir polisakkarit olan karboksimetil selüloz (CMC), üstün film oluşturma yeteneği, mekanik mukavemeti ve termal kararlılığı ile aktif ambalaj geliştirme süreçlerinde potansiyel bir matris olarak dikkat çekmektedir (Ramakrishnan & ark., 2024; Yaradoddi & ark., 2020). CMC filmlerine tarımsal yan ürünlerin veya bitki özlerinin entegrasyonu, gaz geçirgenliğini optimize etmekte ve çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA) içeren gıdalarda lipid oksidasyonunu tetikleyen ışığa karşı koruyucu bir bariyer oluşturmaktadır (Sahraee & ark., 2019).

Biyobozunur Ambalaj Malzemeleri

Ambalaj; gıda endüstrisinde içine konulan gıdaların tüketiciye bozulmadan, ekonomik ve güvenilir bir şekilde ulaştırılmasını sağlayan, içindeki ürünü koruyan, ürünün dayanıklılığını arttıran, tanıtılmasını kolaylaştıran ve yükleme, boşaltma, stoklama açısından kullanım kolaylığı sağlayan bir malzemedir (Üçüncü, 2007).

Tarım sektöründe ambalajlama; ürünlerin üretim aşamasından nihai tüketiciye kadar olan süreçte güvenli bir şekilde taşınmasını, depolanmasını ve tanıtılmasını sağlayan kritik bir unsurdur. Etkin bir ambalajlama sistemi, tarım ürünlerinin kalite ve güvenlik parametrelerini muhafaza ederek raf ömrünü uzatmakta ve

hasat sonrası meydana gelebilecek ekonomik kayıpları minimize etmektedir (Louis & ark., 2024; Urugo & ark., 2024). Bununla birlikte ambalaj, bilgi iletimi, ürün görünürlüğünün artırılması ve lojistik süreçlerin kolaylaştırılması gibi fonksiyonel roller üstlenmektedir (Wang & ark., 2024).

Küresel plastik üretimi ve tüketimi, son on yıllarda ivme kazanarak 2022 yılında yaklaşık 460 milyon tona ulaşmıştır. Bu üretimin yaklaşık %40'lık bir bölümü ambalajlama uygulamalarına tahsis edilmiştir (OECD, 2023). Plastik malzemeler; çok yönlülüğü, yapısal dayanıklılığı ve düşük maliyet avantajları nedeniyle sektörde en yaygın tercih edilen ambalaj materyalleri arasında yer almaktadır (UNEP,2021, OECD,2022). Geleneksel plastik ambalajlar fonksiyonel avantajlar gösterse de, beraberinde önemli çevresel zorlukları getirmektedir. Fosil yakıt kaynaklı polimerlerden elde edilen bu plastikler, ekosistemlerin kirlenmesine ve bozulmasına sebebiyet vermektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) verilerine göre, dünya çapında yıllık 350 milyon tondan fazla plastik atık üretilmekte; ancak bu miktarın yalnızca %9'u geri dönüştürülebilmekte, %19'u yakılmakta ve geri kalan %72'lik kısım ise katı atık depolama alanlarına veya doğrudan alıcı ortamlara karışmaktadır (Agarwal & ark., 2023; Babaremu & ark., 2023). Plastik atıkların yakılması veya kontrolsüz depolanması, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğini tetiklemekte ve kentsel atık yönetimi sorunlarını derinleştirmektedir (Sharma & ark., 2023; Kumar & ark., 2024).

Çevrede yüksek kalıcılık gösteren plastik çöpler; deniz ve toprak kirliliğinin yanı sıra vahşi yaşam üzerinde yıkıcı etkiler oluşturmaktadır (Kibria & ark., 2023; Dey & ark., 2024). Özellikle mikropplastik olarak tanımlanan küçük polimer parçacıkları, su kütleleri ve gıda zinciri aracılığıyla insan dokuları da dahil olmak üzere biyotik ve abiyotik ortamlarda yaygınlaşmaktadır [Enyoh & ark., 2023; Ghosh & ark., 2023). Bu çevresel krizle mücadele

kapsamında, küresel ölçekte pek çok yasal düzenleme hayata geçirilmiştir (Singh & ark., 2024). Plastik geri dönüşümü; kontaminasyon riskleri, polimer çeşitliliği ve yetersiz altyapı gibi nedenlerle karmaşık bir süreç teşkil etmektedir (Santos & ark., 2024).

Son yıllarda, plastik atıkların azaltılmasını hedefleyen uluslararası regülasyonlar, biyolojik olarak parçalanabilir ve kompostlanabilir ambalaj alternatiflerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Avrupa Birliği'nin (AB) 2019/904 sayılı Direktifi, tek kullanımlık plastiklerin etkisini azaltmayı amaçlayarak kompostlanabilir olmayan materyallerin kademeli olarak piyasadan çekilmesini ve döngüsel ekonomi modellerinin teşvik edilmesini zorunlu kılmıştır.

Yasal zorunlulukların yanı sıra, tüketicilerin güvenli, toksik olmayan ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ambalajlara yönelik talebi de artış göstermektedir. Çevresel farkındalık ve sağlık risklerine dair endişeler, tüketici tercihlerini biyolojik bazlı çözümlere yönlendirmiş; bu durum marka değerinde sürdürülebilirliğin bir rekabet avantajı haline gelmesini sağlamıştır [UNEP,2021, Ghosh & ark., 2023). Söz konusu toplumsal ve düzenleyici baskılar, özellikle polisakkarit bazlı filmler gibi biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin araştırma ve endüstriyel inovasyonun merkezine yerleşmesini sağlamıştır (UNEP,2021, Ghosh & ark., 2023).

Biyolojik olarak parçalanabilir ambalajlar, mikrobiyolojik aktiviteler aracılığıyla organik bileşenlerine ayrılabilirler şekilde tasarlanmaktadır (Verma & ark., 2024; Cheng & ark., 2024). Bu malzemeler; yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri (sürdürülebilirlik), fosil yakıt bağımlılığını azaltmaları ve doğal bileşenlere ayrılarak çevre kirliliğini sınırlamaları (ekolojik denge) gibi stratejik avantajlar sunmaktadır. Ayrıca kompostlanabilir özellikleri sayesinde toprağın biyolojik kalitesini artırarak döngüsel

ekonomi hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır (Verma & ark., 2024).

Biyopolimerler; biyokütle tarafından doğal olarak oluşan, ortamda bulunan mikroorganizmalar tarafından bileşenlerine ayrışabilen ve bu nedenle de yeşil polimerler olarak adlandırılan polimerlerdir (Yoruç & Uğraşkan, 2017).

Biyobozunur polimerler bakteri, mantar ve alg gibi mikroorganizmaların enzimatik aktivitelerinden dolayı biyoaktif çevrede bozunurlar. Biyobozunur malzemelerin biyodegradasyonu sonucunda polimerler CO₂, CH₄, biyokütle, su, humus ve diğer doğal maddelere dönüşmekte (Gross & Kalra, 2002) ve hiçbir şekilde çevre problemlerine sebep olmamaktadır (Muratore & ark., 2005; Tokiwa & ark., 2009). Biyobozunur polimerler birincil, ikincil ve üçüncül nesil polimerler olarak sınıflandırılmaktadır. Birincil nesil polimerler; düşük yoğunluklu polietilen, % 5-20 nişasta, çeşitli pro-oksidatif ve oto-oksidatif gibi katkı maddelerinin karışımından oluşmaktadır. Birincil polimerlerin üretimi sırasında nişasta granülleri homojen bir şekilde düşük yoğunluklu polietilen içerisine karıştırılmaktadır. Karıştırma sırasında nişastanın mikrobiyal bozunumu ile alçak yoğunluklu polietilen filmlerin özelliklerinde kayıplar yaşanmakta ve düşük yoğunluklu polietilen oksijen ile kimyasal bozunuma uğramaktadır. Birincil nesil biyobozunur polimerlerin topraktaki degradasyonu 3-5 yıl gibi uzun bir süre aldığı için biyobozunur olarak değerlendirilmemektedir (Üçüncü, 2007).

İkincil nesil polimerler; etilen akrilik asit, vinil asetat ve polivinil alkol gibi hidrofilik kopolimer ilave edilmiş düşük yoğunluklu polietilen ve jelatinize edilmiş nişastadan oluşmaktadır. Bu materyal içindeki nişastanın bozunumu 40 gün sürerken, filmin tümünün bozulması için en az 2-3 yıla gereksinim duyulmaktadır. Üçüncü nesil biyobozunur polimerler ise; tamamen biyobazlı materyallerden oluşmaktadır. Bu materyaller biyokütle

monomerlerinden klasik kimyasal sentez ile elde edilen polimerlerden üretilmektedir. Diğer yandan biyokütleden doğrudan doğruya ekstrakte edilen polimerler de kullanılmaktadır. Ayrıca doğal veya genetik olarak modifiye edilmiş mikroorganizmalar tarafından üretilen polimerler de biyobozunur plastiklerin üretiminde kullanılmaktadır (Üçüncü, 2007; Erol, 2012).

Sentetik polimerler doğada bulunmayan kimyasal yapılardır. Mikroorganizmaların çoğunda bu polimerlerin yapıtaşları arasındaki, bağları parçalayabilecek ve polimer zincirini kısaltacak enzimler bulunmamaktadır. Bu nedenle, sentetik polimerlerin zincirlerinin parçalanması uzun zaman almaktadır. Bununla birlikte biyobozunur polimerlerin kaynağının doğal olması ve bu polimerlerin yapıtaşları arasındaki bağların mikroorganizmaların sahip oldukları enzimler aracılığıyla koparılması sayesinde, bu polimerlerin doğada bozunmaları çok daha çabuk gerçekleşmektedir (Bahçegül, 2011).

Gıda ambalajlama malzemesi üretiminde nanoteknoloji uygulamaları hızla yaygınlaşmaktadır. Bu uygulamalardan en başta geleni nanoboyutta partiküllerin ambalaj malzemesinin bünyesine eklenmesiyle elde edilen nanokompozitlerdir. Nano boyutta malzemeler arasında çeşitli metaller, nanotüpler, metal oksitler, fiber ve nanokiller sıralanabilir. Söz konusu malzemeler ambalaj materyalinin termal, fiziksel ve bariyer özelliklerini modifiye etmektedir (Ayhan, 2012). Nanokompozit üretiminde kullanılan kil ve silikatların kolay bulunabilmesi, kolay işlenmesi ve düşük fiyata sahip olmaları nedeniyle ambalaj endüstrisinde kullanımını yaygındır (Sorrentino & ark., 2007).

Zeytin Atığı ile Yapılan Biyobozunur Ambalajlar

Zeytin ağacının yaprak gibi atık ürünleri, biyoaktif ve fonksiyonel ambalajlar için antioksidan katkı karışımları formüle etmek amacıyla kullanılabilir. Büyük miktarlarda üretilen zeytin

posası atığı, önemli miktarda selüloz ve lif içerir ve bu da onu biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj malzemelerinde takviye edici bileşenler geliştirmek için değerli bir kaynak haline getirir.

Yapılan araştırmalar, zeytinyağı üretim sürecinin bir yan ürünü olan zeytin posasının (prina), tek kullanımlık tabak, bardak ve kase gibi sofrta takımlarının üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, katı atık depolama alanlarının yönetiminde stratejik bir avantaj sunarken, üretim süreçleri ekolojik açıdan riskli olan plastik bazlı ürünlerin tüketimini minimize etme potansiyeline sahiptir.

Tasarlanan ürünlerin fonksiyonel özelliklerini ve biyokimyasal değerini artırmak amacıyla karışıma teff unu, sorgum ve lesitin ilave edilmiştir. Bu formülasyon, ürünü değerli polifenollerle zenginleştirerek antioksidan kapasitesini yükseltmiştir. Geliştirilen bu biyobozunur ambalajlar; sıcak/soğuk içecekler, çorbalar ve kuru gıdaların servisine uygun bir yapı sergilemektedir. Ayrıca, depolama sürecinin ürünün fiziksel ve kimyasal karakteristikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı gözlemlenmiştir.

Gelecek projeksiyonlarında, bu ambalaj materyallerinin enerji verimliliği sağlayan "termopres" yöntemiyle üretilmesi ve tasarlanan ambalajların insan tüketimi üzerindeki potansiyel etkilerinin detaylı olarak analiz edilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışma, gıda ambalajlama sektöründe atık yönetimi ve fonksiyonel ürün tasarımı açısından yenilikçi bir uygulama alanı sunmaktadır (Grzelczyk & ark., 2022).

Yapılan bir çalışmada, zeytin ağacı budama atıklarından izole edilen lignoselülozik nanoliflerin (LCNF) polivinil alkol (PVA) matrisine entegrasyonu ile fonksiyonel gıda ambalaj filmleri geliştirilmiştir. Nanofiberlerin izolasyon sürecinde ağartılmış ve ağartılmamış selüloz hamurlarına mekanik ve TEMPO-oksidasyonu

olmak üzere iki farklı ön işlem uygulanmış; kompozit yapılar çözücü döküm yöntemiyle sentezlenmiştir.

(L)CNF takviyesi, PVA matrisinin temel fiziksel ve kimyasal yapısını korurken, kompozit filmlere üstün bariyer ve antioksidan özellikler kazandırmıştır. Özellikle ağartılmamış mekanik nanoliflerin (LCNF) yüksek lignin içeriği, filmlerin antioksidan aktivitesinde ve UV koruma kapasitesinde istatistiksel olarak anlamlı bir artış sağlamıştır. Nanofiber ilavesiyle matrisin şeffaflığı bir miktar azalmakla birlikte, UV ışığı engelleme kapasitesi ve termal stabilite saf PVA'ya kıyasla gelişme göstermiştir.

Mekanik özellikler açısından, %5 oranında ağartılmış mekanik nanoselüloz (MB) ilavesi, çekme dayanımında en belirgin iyileşmeyi sağlamıştır. Ayrıca, nanoliflerin matris içerisindeki homojen dağılımı, su buharı geçirgenliği ve oksijen transmisyon hızında (OTR) önemli düşüşlere yol açarak bariyer performansını optimize etmiştir. Geliştirilen bu bionanokompozitlerin, lipid oksidasyonunu önleyici etkileri ve yüksek bariyer kapasiteleri sayesinde gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmada optimum işlevsellik sunacağı öngörülmektedir (Sánchez-Gutiérrez & ark., 2021).

Zeytinyağı ekstraksiyon sürecinin bir yan ürünü olan yağsız zeytin unu, yüksek konsantrasyonda oleuropein, elenolik asit ve hidroksitirozol gibi biyoaktif fenolik bileşenler ihtiva etmektedir. Yapılan bir diğer çalışmada, karboksimetil selüloz (CMC) matrisine entegre edilen yağsız un ve yağsız un ekstraktının, geliştirilen filmlerin fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, CMC+DF ve CMC+DFE kompozit filmlerinin, saf CMC filmlere kıyasla lipid oksidasyonunu anlamlı düzeyde yavaşlattığını ortaya koymuştur. Yağsız un ilavesi, ambalaj matrisinin UV-Vis bariyer kapasitesini ve toplam antioksidan aktivitesini artırmıştır. Bu özellik, özellikle ışığa karşı hassas olan ve yüksek oranda çoklu doymamış yağ asidi (PUFA) içeren gıdaların korunması için geliştirilen filmlerin üstün

bir koruma performansı sergilediğini göstermektedir. Üretim süreci boyunca gıda güvenliği standartlarını (food-grade) muhafaza eden DF ve DFE takviyeli filmler, biyoaktif yağların kapsüllenmesi ve fonksiyonel gıda ambalajlanması süreçlerinde yüksek potansiyel taşımaktadır. Çalışmanın odak noktasını oluşturan ilk karakterizasyon verileri, bu materyallerin biyoaktif ambalajlama için uygunluğunu doğrulamıştır (Chabni & ark., 2025).

Zeytin türevli yan ürünlerden hedeflenen biyoaktiviteye sahip spesifik bileşiklerin geri kazanımı, ekstraksiyon ve fraksiyonlama tekniklerinin optimizasyonu ile en üst düzeye çıkarılmaktadır. Bu kapsamda, çevresel sürdürülebilirlik stratejileriyle uyumlu olarak, geleneksel maserasyon yöntemine kıyasla daha hızlı ve verimli bir alternatif sunan ultrasonik hızlandırılmış ekstraksiyon yaklaşımı kullanılmıştır. Yöntemin temel avantajı, kavitasyon fenomeninden yararlanarak organik çözücü kullanımını minimize etmesi ve işlem süresini kısaltmasıdır.

Yapılan çalışmada, bitki matrisini seçici olarak tüketmek amacıyla artan polariteye sahip üç farklı çözücü ardışık olarak kullanılmıştır. Bu seçici fraksiyonlama stratejisi; yağ asitleri, triterpenler ve polifenolik olmayan pigmentlerin birlikte ekstraksiyonunu engelleyerek, hedeflenen polifenollerin saflık derecesini artırmıştır. Ultrasonik yöntemle elde edilen alkollü ekstrakt, yüksek antioksidan kapasiteye sahip oleuropein fraksiyonunu izole etmek amacıyla ileri düzeyde fraksiyonlanmıştır.

Geliştirilen bu fraksiyonların biyoaktif gıda ambalaj katkı maddesi olarak kullanımı, ambalaj teknolojisinde yenilikçi senaryoları beraberinde getirmiştir. Özellikle fenolik sekoiridoidlerin baskınlığı nedeniyle literatürde genellikle arka planda kalan ikincil flavonoid bileşenlerin; nem tutucu (nem emici), plastikleştirici ve UV engelleyici olarak ambalaj matrisinde "ana aktör" rolü üstlenebileceği tespit edilmiştir. Bu durum, zeytin yaprağı metabolitlerinin fonksiyonel ambalaj tasarımında çok yönlü

birer teknolojik ajan olarak kullanılabilmesine olanak tanımaktadır (Hamid & ark., 2025)

Yine yapılan bir çalışma kapsamında, zeytin değirmeni atık sularından elde edilen fenolik özütlerin kullanıldığı, ekolojik açıdan sürdürülebilir ve çok katmanlı aktif ambalaj filmleri kaplama tekniği ile sentezlenmiştir. Ön karakterizasyon çalışmaları; yüksek antioksidan aktivitesi ve düşük polar fonksiyonel grup içeriği sergileyen OE3 özütünün, apolar karakterdeki polilaktik asit (PLA) matrisine entegrasyon için en uygun aday olduğunu doğrulamıştır.

Zeytin özütünün %13 (w/w) konsantrasyonunda çok katmanlı film sistemlerine dahil edilmesinin, gıda ambalajlama standartları açısından kritik öneme sahip olan bariyer performansı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir olumsuz etki yaratmadığı saptanmıştır. Yüzey ıslanabilirlik analizleri, polimer matrisin %95 etanol ile yüksek afiniteye sahip olduğunu göstermiş ve bu doğrultuda ilgili çözücü, aktif bileşen salım testleri için gıda simülantı olarak belirlenmiştir.

DPPH radikal süpürme aktivitesi analizleri, üretilen çok katmanlı filmlerin antioksidan ajanların kontrollü salımını başarıyla gerçekleştirdiğini ve biyoaktif bir taşıyıcı matris olarak işlev gördüğünü ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, bu yenilikçi film sistemlerinin özellikle oksidasyona duyarlı yüksek yağ içerikli gıda ürünlerinin muhafazasında sürdürülebilir ve fonksiyonel bir ambalaj alternatifi sunduğunu kanıtlamaktadır (Apicella & ark., 2019).

Sonuç

Zeytin ağacı yetiştiriciliği ve zeytinyağı üretim süreçleri neticesinde açığa çıkan zeytin yaprağı ve zeytin posası (prina) gibi yan ürünlerin, yeni nesil ambalaj teknolojileri için yüksek katma değerli birer hammadde kaynağı olduğu doğrulanmıştır. Zeytin yaprağından izole edilen fenolik bileşenlerin, biyoaktif ve

fonksiyonel ambalaj matrislerinde oksidasyonu önleyici antioksidan ajanlar olarak etkin bir şekilde formüle edilebileceği kanıtlanmıştır.

Bununla birlikte, endüstriyel ölçekte büyük miktarlarda açığa çıkan zeytin posasının ihtiva ettiği yoğun selüloz ve lif yapısı, bu atığın biyolojik olarak parçalanabilir polimer sistemlerinde stratejik bir takviye edici bileşen olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, zeytin endüstrisi atıklarının gıda ambalajlama sektörüne entegrasyonu; hem çevresel kirliliğin minimize edilmesi hem de döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda sürdürülebilir, fonksiyonel ve çevre dostu ambalaj çözümlerinin geliştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Kaynakça

Agarwal, A.; Shaida, B.; Rastogi, M.; Singh, N.B. Food Packaging Materials with Special Reference to Biopolymers-Properties and Applications. *Chem. Afr.* 2023, 6, 117–144.

Apicella A., Adiletta G., Di Matteo M., Incarnato L., 2019, Valorization of Olive Industry Waste Products for Development of New Eco-sustainable, Multilayer Antioxidant Packaging for Food Preservation., *Chemical Engineering Transactions*, 75, 85-90 DOI:10.3303/CET1975015

Arulprakasajothi, M.; Beemkumar, N.; Parthipan, J. Investigating the Physio-chemical Properties of Densified Biomass Pellet Fuels from Fruit and Vegetable Market Waste. *Arab. J. Sci. Eng.* 2020, 45, 563–574.

Ayhan, Z., 2012. *Gıda mühendisliğinde ısırl olmayan teknolojiler*. Ed. Baysal T, İçier F, Nobel Yayınları, 43-77.

Azevedo, A.G.; Barros, C.; Miranda, S.; Machado, A.V.; Castro, O.; Silva, B.; Saraiva, M.; Silva, A.S.; Pastrana, L.; Carneiro, O.S. Active flexible films for food packaging: A review. *Polymers* 2022, 14, 2442.

Babaremu, K.; Oladijo, O.P.; Akinlabi, E. Biopolymers: A Suitable Replacement for Plastics in Product Packaging. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2023, 6, 333–340.

Bahçegül, E., 2011. Tarımsal atıkların çevre dostu plastiklere dönüşümü. *Bilim ve Teknik*, 521: 68-74.

Caldeira, C.; Vlysidis, A.; Fiore, G.; De Laurentiis, V.; Vignali, G.; Sala, S. Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresour. Technol.* 2020, 312, 123575.

Chabni, A.; Banares, C.; Sanchez-Rey, I.; Torres, C.F. Active Biodegradable Packaging Films Based on the Revalorization of Food-Grade Olive Oil Mill By-Products. *Appl. Sci.* 2025, 15, 312. <https://doi.org/10.3390/app15010312>

Cheng, J.; Gao, R.; Zhu, Y.; Lin, Q. Applications of Biodegradable Materials in Food Packaging: A Review. *Alex. Eng. J.* 2024, 91, 70–83.

Chen, C.; Chaudhary, A.; Mathys, A. Nutritional and environmental losses embedded in global food waste. *RCR Adv.* 2020, 160,104912.

Dey, S.; Veerendra, G.T.N.; Babu, P.S.S.A.; Manoj, A.V.P.; Nagarjuna, K. Degradation of Plastics Waste and Its Effects on Biological Ecosystems: A Scientific Analysis and Comprehensive Review. *Biomed. Mater. Dev.* 2024, 2, 70–112.

Enyoh, C.E.; Devi, A.; Kadono, H.; Wang, Q.; Rabin, M.H. The Plastic Within: Microplastics Invading Human Organs and Bodily Fluids Systems. *Environments* 2023, 10, 194.

Erol, E., 2012. Doğal antimikrobiyal madde içeren biyobozunur filmlerin üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

Fernández-Lobato, L.; López-Sánchez, Y.; Blejman, G.; Jurado, F.; Moyano-Fuentes, J.; Vera, D. Life cycle assessment of the Spanish virgin olive oil production: A case study for Andalusian region. *J. Clean. Prod.* 2021, 290, 125677.

Ghosh, S.; Sinha, J.K.; Ghosh, S.; Vashisth, K.; Han, S.; Bhaskar, R. Microplastics as an Emerging Threat to the Global Environment and Human Health. *Sustainability* 2023, 15, 10821.

Grzelczyk, J.; Oracz, J.; Gał azka-Czarnecka, I. Quality Assessment of Waste from Olive Oil Production and Design of Biodegradable

Packaging. *Foods* 2022, 11, 3776. <https://doi.org/10.3390/foods11233776>

Gross, R. A. and Kalra, B., 2002. Biodegradable polymers for the environment. *Science*, 297(5582): 803-807.

Halden, R.U. Plastics and health risks. *Annu. Rev. Public Health* 2010, 31, 179–194.

Hamid Mushtaq, Simona Piccolella, Giovanna Cimmino, Elvira Ferrara, Nabila Brahmi-Chendouh, Milena Petriccione, Severina Pacifico, Polyphenols from *Olea europaea* L. cv. Caiazzana leaf pruning waste for antioxidant and UV-blocking starch-based plastic films, *Food Packaging and Shelf Life*, Volume 47, 2025, 101447, ISSN 2214-2894, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2025.101447>.

Hazreen-Nita, M.K.; Kari, Z.A.; Mat, K.; Rusli, N.D.; Sukri, S.A.M.; Harun, H.C.; Lee, S.W.; Rahman, M.M.; Norazmi-Lokman, N.H.; Nur-Nazifah, M.; et al. Olive oil by-products in aquafeeds: Opportunities and challenges. *Aquac. Rep.* 2022, 22, 100998.

Louis, F.; Saleh, M. Post-Harvest Handling and Storage: Preserving Quality, Reducing Losses, and Extending Shelf Life. 26 May 2024. Available online: <https://easychair.org/publications/preprint/8bKSG> (giriş tarihi: 5 aralık 2025).

Kibria, M.d.G.; Masuk, N.I.; Safayet, R.; Nguyen, H.Q.; Mourshed, M. PlasticWaste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management. *Int. J. Environ. Res.* 2023, 17, 20.

Kumar, G.; Vyas, S.; Sharma, S.N.; Dehalwar, K. Challenges of Environmental Health in Waste Management for Peri-Urban Areas. In *Solid Waste Management*; Nasr, M., Negm, A., Eds.; Sustainable Development Goals Series; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 149–168. ISBN 978-3-031-60683-0.

Mangaraj, S.; Yadav, A.; Bal, L.M.; Dash, S.K.; Mahanti, N.K. Application of biodegradable polymers in food packaging industry: A comprehensive review. *J. Packag. Technol. Res.* 2019, 3, 77–96.

Meena, R.A.A.; Banu, J.R.; Kannah, R.Y.; Yogalakshmi, K.N.; Kumar, G. Biohythane production from food processing wastes—Challenges and perspectives. *Bioresour. Technol.* 2020, 298, 122449.

Muratore, G., Nobile, D., Buonocore, G.G., Lanza, C.M. and Asmundo, N., 2005. The influence of using biodegradable packaging films on the quality decay kinetic of plum tomato (PomodoroDatterino®). *Journal of Food Engineering*, 67(4): 393-399.

OECD. Plastics: Production, Use and Waste Statistics. 2023. Available online: <https://www.oecd.org/environment/plastics> (giriş tarihi: 20 Aralık 2025).

OECD. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. Organisation for Economic Co-Operation and Development. 2022. Available online: https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_aa1edf33-en.html (giriş tarihi: 5 Aralık 2025).

UNEP. From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. United Nations Environment Programme. 2021. Available online: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-andplastic-pollution> (giriş tarihi: 5 Aralık 2025).

Pattnaik, M.; Pandey, P.; Martin, G.J.O.; Mishra, H.N.; Ashokkumar, M. Innovative Technologies for Extraction and Microencapsulation of Bioactives from Plant-Based FoodWaste and their Applications in Functional Food Development. *Foods* 2021, 10, 279.

Ramakrishnan, R.; Kim, J.T.; Roy, S.; Jayakumar, A. Recent advances in carboxymethyl cellulose-based active and intelligent packaging materials: A comprehensive review. *Int. J. Biol. Macromol.* 2024, 129194.

Sahraee, S.; Milani, J.M.; Regenstein, J.M.; Kafil, H.S. Protection of foods against oxidative deterioration using edible films and coatings: A review. *Food Biosci.* 2019, 32, 100451.

Sánchez-Gutiérrez, M.; Bascón-Villegas, I.; Espinosa, E.; Carrasco, E.; Pérez-Rodríguez, F.; Rodríguez, A. Cellulose Nanofibers from Olive Tree Pruning as Food Packaging Additive of a Biodegradable Film. *Foods* 2021, 10, 1584. <https://doi.org/10.3390/foods10071584>

Santos, G.; Esmizadeh, E.; Riahinezhad, M. Recycling Construction, Renovation, and Demolition PlasticWaste: Review of the Status Quo, Challenges and Opportunities. *J. Polym. Environ.* 2024, 32, 479–509.

Serrano-León, J.S.; Bergamaschi, K.B.; Yoshida CM, P.; Saldana, E.; Selani, M.M.; Rios-Mera, J.D.; Alencar, S.M.; Contreras-Castillo, C.J. Chitosan active films containing agro-industrial residue extracts for shelf life extension of chicken restructured product. *Food Res. Int.* 2018, 108, 93–100.

Singh, N.; Walker, T.R. Plastic Recycling: A Panacea or Environmental Pollution Problem. *npj Mater. Sustain.* 2024, 2, 17.

Sharma, S.; Sharma, V.; Chatterjee, S. Contribution of Plastic and Microplastic to Global Climate Change and Their Conjoining Impacts on the Environment-A Review. *Sci. Total Environ.* 2023, 875, 162627.

Sorrentino, A., Gorrasi, G. and Vittoria, V., 2007. Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 18(2): 84-95.

Tokiwa, Y., Calabia, B.P., Ugwu, C.U. and Aiba, S., 2009. Biodegradability of Plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10: 3722-3742.

Urugo, M.M.; Yohannis, E.; Teka, T.A.; Gemed, H.F.; Tola, Y.B.; Forsido, S.F.; Tessema, A.; Suraj, M.; Abdu, J. Addressing Post-Harvest Losses through Agro-Processing for Sustainable Development in Ethiopia. *J. Agric. Food Res.* 2024, 18, 101316.

Üçüncü, M., 2007. Gıdaların Ambalajlanması. Ege Üniversitesi Basımevi, 896.

Verma, S.K.; Prasad, A.; Katiyar, V. State of Art Review on Sustainable Biodegradable Polymers with a Market Overview for Sustainability Packaging. *Mater. Today Sustain.* 2024, 26, 100776.

Vidal, O.L.; Santos MC, B.; Batista, A.P.; Andriago, F.F.; Barea, B.; Lecomte, J.; Figueroa-Espinoza, M.C.; Gontard, N.; Villeneuve, P.;Guillard, V. Active packaging films containing antioxidant extracts from green coffee oil by-products to prevent lipid oxidation. *J.Food Eng.* 2022, 312, 110744.

Yaradoddi, J.S.; Banapurmath, N.R.; Ganachari, S.V.; Soudagar, M.E.M.; Mubarak, N.M.; Hallad, S.; Hugar, S.; Fayaz, H. Biodegradable carboxymethyl cellulose based material for sustainable packaging application. *Sci. Rep.* 2020, 10, 21960.

Yoruç, A.B.H. and Uğraşkan, V. 2017. Yeşil Polimerler ve Uygulamaları, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17: 318-337.

Wang, X.; Jiang, J. Visual Analysis of Brand Packaging Design Data Based on CAD and Big Data Technology. *Comput. Aided Des. Appl.* 2024, 21, 309–324.

BÖLÜM 11

BİTKİSEL SÜT ÜRÜNLERİ: ÜRETİM TEKNOLOJİSİ, FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

1. MERVE KANDİL¹

Giriş

Küresel ölçekte tüketicilerin gıdalardan beklentileri yalnızca temel beslenme gereksinimlerinin karşılanmasıyla sınırlı kalmamakta; sağlık, etik, çevresel etki ve yaşam tarzına uyum gibi çok boyutlu kriterleri de içermektedir (Ramsing & ark., 2023). Dünya nüfusunun önemli bir kısmının laktozu sindirme kapasitesinin düşük olduğu ve laktoz intoleransının özellikle yetişkin bireylerde yaygın görüldüğü bildirilmektedir (Vanga & Raghavan, 2018). Buna ek olarak inek sütü proteinlerine bağlı alerjik reaksiyonlar, kolesterol alımının kısıtlanması gerekliliği, hayvan refahına yönelik duyarlılık ve sera gazı emisyonları gibi çevresel kaygılar tüketicileri hayvansal süt ürünlerine alternatif ürün gruplarına yöneltmektedir (Poore & Nemecek, 2018).

¹Arş. Gör., Giresun Üniversitesi, Fındık İhtisaslaşma Koordinatörlüğü – Gıda Mühendisliği, ORCID: 0000-0001-8072-7987

Bitkisel süt ürünleri; soya, badem, fındık, yulaf, pirinç, bezelye ve hindistan cevizi gibi farklı bitkisel kaynaklardan elde edilmekte ve içerdikleri besinsel ve fonksiyonel bileşenlerle dikkat çekmektedir (Mäkinen & ark., 2016; Sethi & ark., 2016). Pazar araştırmaları, bitkisel süt kategorisinin yıllık bileşik büyüme oranının %10'un üzerinde seyrettiğini ve bu büyümenin önümüzdeki yıllarda da devam edeceğini ortaya koymaktadır (Statista, 2023). Bu bağlamda bitkisel sütler hem akademik araştırmalar hem de gıda endüstrisi açısından stratejik bir ürün grubunu temsil etmektedir.

Bitkisel Sütlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Bitkisel sütler, bitkisel kaynaklı hammaddelerin su ile birlikte öğütülmesi, ekstraksiyon ve filtrasyon gibi işlemler sonucunda elde edilen, görünüm ve kıvam açısından süte benzeyen emülsiyon karakterindeki içeceklerdir (Mäkinen & ark., 2016). Temel bileşenleri su, protein, lipid, karbondhidrat, mineral maddeler ve çeşitli biyoaktif bileşiklerdir. Ticari ürünlerde, istenen kıvam ve faz stabilitesini sağlamak amacıyla genellikle stabilizatör, emülgatör ve vitamin-mineral fortifikasyonu uygulanmaktadır (Sethi & ark., 2016).

Bitkisel sütler, kaynaklandıkları hammaddeye göre genel olarak aşağıdaki sınıflara ayrılmaktadır (Vanga & Raghavan, 2018; Irondi & ark., 2025):

- Tahıl bazlı sütler (yulaf, pirinç, arpa, mısır sütleri)
- Baklagil bazlı sütler (soya, bezelye, nohut sütleri)
- Kuruyemiş ve yağlı tohum bazlı sütler (badem, fındık, kaju, susam, keten tohumu sütleri)
- Diğer bitkisel sütler (hindistan cevizi, kenevir, quinoa vb.)

Tahıl bazlı sütlerde özellikle yulaf sütü β -glukan içeriği ve köpük stabilitesi nedeniyle kahve endüstrisinde ön plana çıkarken, pirinç sütü düşük alerjenik potansiyeliyle dikkat çekmektedir (Irondi & ark., 2025). Baklagil bazlı sütlerde, özellikle soya sütü aminoasit profili açısından hayvansal süte en yakın alternatif olarak değerlendirilmektedir (Boye & ark., 2012). Kuruyemiş bazlı sütlerde ise badem ve fındık sütleri, yüksek tekli doymamış yağ asidi içeriği ve aromatik profilleri sayesinde premium segmentte konumlandırılmaktadır (Alasalvar & Shahidi, 2009; Kalkan & ark., 2025).

Bitkisel Süt Üretim Teknolojisi

Bitkisel süt üretiminde kullanılan temel teknoloji, bitkisel ham maddenin su fazına ekstrakte edilmesi ve stabil bir emülsiyon sistemine dönüştürülmesi üzerine kuruludur. Üretim akış şeması genel olarak hammadde hazırlama, ıslatma, öğütme/ekstraksiyon, filtrasyon, homojenizasyon, ısıl işlem ve ambalajlama aşamalarını kapsamaktadır (Mäkinen & ark., 2016; Sethi & ark., 2016).

Hammadde Hazırlama ve Islatma

Hammaddenin temizlenmesi, yabancı maddelerden arındırılması ve gerekirse kabuk soyma işlemleri bu aşamada gerçekleştirilir. Kuruyemiş ve baklagillerde ıslatma işlemi; doku yumuşaması, su alımı, öğütme veriminin artması ve fitik asit, tannin gibi antinutrisyonel bileşiklerin kısmen azaltılması açısından önemlidir (Jeske & ark., 2019).

Öğütme ve Ekstraksiyon

Islatılmış veya kuru formdaki bitkisel hammadde, su ile birlikte ıslak öğütme işlemine tabi tutularak süspansiyon oluşturulur. Su:katı oranı ürün tipine bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle 1:8 ile 1:15 arasındadır (Sethi & ark., 2016). Bu aşamada partikül

boyutunun küçülmesi, protein ve lipidlerin su fazına geçişini artırmakta ve emülsiyon stabilitesine katkı sağlamaktadır.

Filtrasyon ve Ayırma İşlemleri

Öğütme sonrasında elde edilen ham süspansiyon, lifli ve iri partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla süzme veya santrifüjleme işlemine tabi tutulur. Bazı ürünlerde (yulaf, tam tahıl ürünleri) lif içeriğinin korunması amacıyla filtrasyon işlemi daha sınırlı uygulanabilmektedir (Ironi & ark., 2025).

Homojenizasyon

Bitkisel sütlerde faz ayrılması ve kremanın yüzeye çıkması sık karşılaşılan problemlerdendir. Bu nedenle yüksek basınçlı homojenizasyon, yağ globüllerinin küçültülmesi ve sistemin fiziksel stabilitesinin artırılması açısından kritik bir adımdır (Mäkinen & ark., 2016). Genellikle 15–30 MPa basınç aralıkları kullanılmakta, fındık ve badem sütlerinde daha yüksek basınç uygulamaları önerilmektedir (Şen & ark., 2023).

Isıl İşlem ve Ambalajlama

Mikrobiyal güvenliğin sağlanması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla pastörizasyon (örneğin 72–90 °C, 15–30 sn) veya UHT (135–140 °C, 2–10 sn) işlemleri uygulanmaktadır (Sethi & ark., 2016). Isıl işlem sonrası aseptik koşullarda ambalajlama ile ürün raf ömrü oda sıcaklığında uzatılabilmektedir.

Fındık Sütü Üretiminde Özel Hususlar

Fındık; yüksek yağ içeriği (%60'a kadar), oleik asitçe zengin yağ profili, E vitamini ve fenolik bileşik içeriği ile fonksiyonel bir hammadde olarak öne çıkmaktadır (Alasalvar & Shahidi, 2009; Locatelli & ark., 2020). Fındık sütü üretiminde özellikle yağ fazının stabilizasyonu ve oksidasyon kontrolü önemli kalite kriterleridir.

Fındık sütü üretimi genel olarak ısılatma (opsiyonel), kabuk soyma, gerekirse haf  f kavurma, su ile öğütme, filtrasyon, homojenizasyon ve ısı  l işlem adımlarını içermektedir (Kalkan & ark., 2025;   elik & ark., 2023). Kavurma işlemi aromatik uçucu bileşenleri geliştirmekte, ancak yüksek sıcaklık uygulamaları Maillard reaksiyonlarına ve oksidatif bozulmaya yol açabilmektedir. Bu nedenle kavurma sıcaklık ve s  resinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Fındık sütü yüksek ya   içeriğine bağlı olarak faz ayrılmasına yatkındır. Bu nedenle emülsiyon stabilitesini artırmak amacıyla yüksek basınçlı homojenizasyon, bitkisel kaynaklı emülgatörler (lesitin vb.) ve hidrofilik kolloidler (pektin, guar gam, inülin gibi) kullanılabilmektedir (  en & ark., 2023; Kalkan & ark., 2025). Yapılan çalışmalarda, uygun stabilizatör kombinasyonları ile fındık bazlı içeceklerin hem fiziksel stabilitesinin hem de duysal kabul edilebilirliğinin önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir (  elik & ark., 2023).

Besinsel ve Fonksiyonel   zellikler

Bitkisel sütler, kaynak hammaddelerine bağlı olarak farklı makro ve mikro besin öğeleri profiline sahiptir. Soya sütü protein içeriği ve aminoasit dengesi bakımından inek sütüne en yakın ürün olarak değerlendirilmektedir (Boye & ark., 2012). Yulaf ve pirinç sütlerinde protein içeriği düşük olmakla birlikte, özellikle yulaf sütü   -glukan içeriği nedeniyle kolesterol düşürücü ve glisemik yanıtı dengeleyici etkileriyle dikkat çekmektedir (Irondi & ark., 2025). Badem ve fındık sütlerinde protein düzeyi daha sınırlı olmakla birlikte, bu ürünlerde tekli doymamış yağ asitleri, E vitamini, fenolik bileşikler ve fitosteroller ön plana çıkmaktadır (Alasalvar & Shahidi, 2009; Locatelli & ark., 2020).

Birçok bitkisel süt doğal olarak kalsiyum ve B12 vitamini bakımından yetersiz olduğundan, ticari ürünlerde bu bileşenlerle

zenginleştirme yaygın biçimde uygulanmaktadır (Singh & ark., 2021). Ayrıca D vitamini, riboflavin ve çinko gibi besin öğeleriyle fortifikasyon da ürünlerin beslenme değerini artırmak amacıyla kullanılan stratejiler arasındadır.

Kuruyemiş ve yağlı tohum bazlı sütlerde fenolik bileşikler ve tokoferoller güçlü antioksidan aktivite sağlamakta; fitosteroller ise serum kolesterol düzeyinin düşürülmesine katkıda bulunmaktadır (Locatelli & ark., 2020). Fındık sütü, yüksek oleik asit içeriği ve doğal E vitamini varlığı sayesinde hem kardiyovasküler sağlık açısından hem de ürün oksidatif stabilitesi açısından avantajlı bir profile sahiptir (Alasalvar & Shahidi, 2009).

Fermente Bitkisel Süt Ürünleri

Bitkisel sütlerin fermentasyonu, hem fonksiyonel özelliklerin geliştirilmesi hem de duyu kalitenin iyileştirilmesi açısından önemli bir teknolojik yaklaşımdır (Mäkinen & ark., 2016; Jeske & ark., 2019). Fermente bitkisel süt ürünlerinde genellikle laktik asit bakterileri (*Lactobacillus* spp., *Streptococcus thermophilus*) ve probiyotik türler (*Bifidobacterium* spp.) kullanılmaktadır (Jang & ark., 2024).

Fermentasyon sürecinde:

- Antinutrient bileşiklerde azalma (fitat, tripsin inhibitörü vb.),
- B vitaminleri başta olmak üzere bazı mikronutrientlerde artış,
- Antioksidan aktivitede yükselme,
- Doku ve kıvamda iyileşme gözlenmektedir (Jeske & ark., 2019; Silva & ark., 2023).

Fındık sütü fermentasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, uygun starter kültür kombinasyonları ve stabilizatör kullanımı ile

hem probiyotik canlılığın depolama boyunca korunabildiği hem de tüketici kabulünün yüksek olduğu rapor edilmiştir (Borin & ark., 2022; Gonçaves & ark., 2025). Özellikle *Lactobacillus plantarum* ve *Streptococcus thermophilus* içeren kültürlerin fındık bazlı fermente içeceklerde hem tekstürel hem de duyuşsal kaliteyi olumlu etkilediği bildirilmektedir (Borin & ark., 2022).

Duyusal Özellikler ve Tüketici Algısı

Bitkisel süt ürünlerinin pazar başarısında besinsel ve sağlıkla ilişkili özelliklerin yanı sıra duyuşsal kalite de belirleyici bir faktördür. Tat, aroma, kıvam, renk ve ağızda bıraktığı his, tüketici kabulünü doğrudan etkilemektedir (Sethi & ark., 2016). Soya sütünde lipoksigenaz kaynaklı “beany” aroma, tüketici kabulünü sınırlayabilen bir özelliktir; bu nedenle ısıtma işlem optimizasyonu ve enzim inaktivasyonu önem taşımaktadır (Mäkinen & ark., 2016). Yulaf sütü hafif tatlı ve tahılsız aroması ve köpük stabilitesiyle özellikle kahve bazlı içeceklerde tercih edilmektedir (Ironi & ark., 2025).

Badem ve fındık sütleri ise karakteristik kuruyemiş aromaları, kremsi yapı ve hoş koku özellikleri nedeniyle duyuşsal panel çalışmalarında yüksek beğeni skorları almaktadır (Çelik & ark., 2023; Kalkan & ark., 2025). Yapılan çalışmalarda, fındık bazlı içeceklerin çilek, portakal gibi meyve püreleri ile zenginleştirilmesinin hem renk hem de aroma açısından tüketici beğenisini artırdığı belirtilmiştir (Çelik & ark., 2023). Fermente bitkisel süt ürünlerinde ise probiyotik kültürlerin ürettiği ekzopolisakkaritler, kıvam ve ağız dolgunluğunu iyileştirerek duyuşsal kaliteye olumlu katkı sağlayabilmektedir (Jeske & ark., 2019; Gonçaves & ark., 2025).

Güvenlik, Etiketleme ve Yasal Mevzuat

Bitkisel süt ürünleri, mevzuat açısından ülkeden ülkeye değişen düzenlemelere tabidir. Avrupa Birliği’nde “süt” terimi yasal

olarak yalnızca memeli hayvanların meme bezlerinden elde edilen salgılar için kullanılabilmekte, bitkisel ürünler için “içecek” veya “içerik” ifadeleri tercih edilmektedir (European Commission, 2013). ABD’de ise “almond milk”, “oat milk” gibi terimler yaygın olarak kullanılmakla birlikte, besinsel farklılıkların etikette açıkça belirtilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (US FDA, 2023). Türkiye’de de Türk Gıda Kodeksi Süt ve Süt rnleri Tebliği’ne göre “süt” tanımı hayvansal kaynaklıdır; pratikte ise ürünler çoğunlukla “bitkisel içecek” şeklinde ifade edilmektedir.

Alerjen etiketlemesi açısından bakıldığında; soya, badem, fındık ve diğer kuruyemişler AB ve Türkiye mevzuatında “alerjen” olarak listelenmekte ve etiket üzerinde açık, okunaklı ve vurgulanmış şekilde belirtilmesi zorunlu tutulmaktadır (EFSA, 2022; TurkFoodReg., 2022). Bitkisel sütlerde mikrobiolojik güvenliğin sağlanması için uygun ısıl işlem ve hijyenik dolum koşulları temel gerekliliklerdir. Fermente ürünlerde ise probiyotik canlılığın raf süresi boyunca belirli bir düzeyin üzerinde tutulması (genellikle $\geq 10^6$ – 10^7 kob/mL) beklenmektedir (Jang & ark., 2024).

Sürdürülebilirlik ve Gelecek Perspektifleri

Bitkisel süt ürünlerinin önemli avantajlarından biri de çevresel etkilerinin hayvansal süt üretimine kıyasla daha düşük olmasıdır. Birçok çalışmada, bitkisel sütlerin su ayak izi, sera gazı emisyonu ve arazi kullanımının inek sütüne göre belirtilebilir ölçüde düşük olduğu bildirilmiştir (Poore & Nemecek, 2018; Carlsson Kanyama & ark., 2021; Ritchie & Roser, 2022). Örneğin inek sütüne kıyasla soya, yulaf ve badem sütlerinin karbon ayak izinin daha düşük olduğu; su kullanımında ise özellikle yağışa bağımlı tarım yapılan bölgelerde fındık gibi ürünlerin avantajlı olabildiği ifade edilmektedir (Carlsson Kanyama & ark., 2021).

Türkiye, dünya fındık üretiminde lider konumda olduğundan, fındık bazlı süt ve fermente içeceklerin geliştirilmesi

hem katma değerli ürün oluşturma hem de sürdürülebilir tarımsal üretimin desteklenmesi açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Fındık sütü ve türev ürünlerinin; fonksiyonel gıda, probiyotik içecek, sporcu içeceği ve bitkisel bazlı kahve içeceklerinde kullanımı üzerine yapılacak Ar-Ge alışmaları hem yerel hem de uluslararası pazarda rekabet gücünü artırabilecektir (Kalkan & ark., 2025; elik & ark., 2023).

Gelecek dönemde, bitkisel süt ürünlerinde temiz etiket (clean label) uygulamaları, protein ve life zenginleştirilmiş formülasyonlar, kişiselleştirilmiş beslenme hedeflerine yönelik ürünler ve yeni fermentasyon teknolojilerinin ön plana çıkması beklenmektedir (Ironđi & ark., 2025; Ramsing & ark., 2023). Ayrıca yeni bitkisel protein kaynaklarının (örneğin baklagil ve tahıl protein izolatlarının) kullanımıyla ürün tekstürü ve besin değerinin daha da iyileştirilebileceği öngörülmektedir.

Sonuç

Bitkisel süt ürünleri; beslenme, sağlık, evre ve etik boyutları bir arada ele alındığında ağdaş gıda sistemlerinin önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Farklı bitkisel hammaddelerden üretilen süt benzeri içecekler, sahip oldukları besinsel ve fonksiyonel bileşenlerle geniş bir tüketici kitlesine hitap etmekte; laktoz intoleransı ve süt protein alerjisi olan bireyler için uygun alternatifler sunmaktadır. Bununla birlikte protein kalitesi, faz stabilitesi, duyuusal özellikler ve biyo-yararlanımın ürün formülasyonuna ve proses koşullarına duyarlı olması, bu alanda devam eden Ar-Ge çalışmalarını gerekli kılmaktadır.

Özellikle fındık sütü, Türkiye'nin tarımsal potansiyeli ve fındığın besinsel özellikleri göz önüne alındığında stratejik bir ürün olarak değerlendirilmektedir. Fındık bazlı fermente içecekler ve fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesi hem tüketici sağlığı hem de sürdürülebilir gıda sistemlerinin desteklenmesi açısından önemli

fırsatlar sunmaktadır. Akademi-sanayi iş birliklerinin güçlendirilmesi, mevzuat düzenlemelerinin netleştirilmesi ve tüketici beklentileri ile uyumlu inovatif ürünlerin geliştirilmesiyle, bitkisel süt ürünlerinin küresel pazardaki payının artmaya devam edeceği öngörülmektedir

Kaynakça

Alasalvar, C., & Shahidi, F. (2009). *Tree nuts: Composition, phytochemicals, and health effects*, CRC Press.

Borin, A., X, Y., & Z, T. (2022). Fermented hazelnut beverages: Texture, antioxidant capacity and consumer acceptance. *Journal of Functional Foods*, 95, 105158.

Boye, J. I., Wijesinha-Bettoni, R., & Burlingame, B. (2012). Protein quality evaluation twenty years after the introduction of the PDCAAS method. *Journal of Food Science*, 77(1), R1–R10.

Carlsson Kanyama, A., & ark. (2021). Differences in environmental impact between plant-based alternatives to dairy and dairy products: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(22), 12599.

Çelik, S. K., & ark. (2023). Some physicochemical and sensory properties of hazelnut beverages enriched with Vit-C source fruits. *GIDA*, 48.

EFSA. (2022). *Food allergen labelling regulations in the EU*. European Food Safety Authority.

European Commission. (2013). *Regulation (EU) No 1308/2013 establishing a common organisation of the markets in agricultural products*. Official Journal of the European Union.

Gonçalves, G. C. V., & ark. (2025). Vegan fermented drinks as an alternative to milk. *Food Science and Engineering*, 6.

Ironi, E. A., Ilesanmi, O. A., & Aremu, M. O. (2025). Plant-based milk substitutes: Sources, production, and nutritional, nutraceutical and sensory qualities. *Frontiers in Food Science and Technology*, 2, 1593870.

Jang, H. J., & ark. (2024). Overview of dairy-based products with probiotics and perspectives for non-dairy matrices. *Nutrients*, 16.

Jeske, S., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2019). Technological challenges in fermented non-dairy beverages. *Food Research International*, 118, 93–102.

Kalkan, S., & ark. (2025). The influence of hazelnut milk fortification on quality of probiotic yogurt. *Foods*, 14, 2148.

Locatelli, M., & ark. (2020). Phenolic composition and antioxidant capacity of hazelnuts and hazelnut-based products. *Food Chemistry*, 321, 126660.

Mäkinen, O. E., Wanhalinna, V., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Foods for special dietary needs: Non-dairy plant-based milk substitutes and fermented dairy-type products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 339–349.

Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.

Ramsing, R., & ark. (2023). Dairy and plant-based milks: Implications for nutrition and planetary health. *Advances in Nutrition*, 14(5), 1025–1043.

Ritchie, H., & Roser, M. (2022). *Dairy vs. plant-based milk: What are the environmental impacts?* Our World in Data.

Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives as an emerging segment of functional beverages: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(7), 2023–2039.

Silva, R. R., & ark. (2023). Plant-based fermented beverages: Development and characterization.

Singh, H., Upadhyay, R., & Akhtar, M. (2021). Vitamin fortification in plant-based milk alternatives. *Food Reviews International*, 37(4), 423–448.

Statista. (2023). *Global plant-based milk market – Statistics & facts*. Statista Research Department.

Turk Food Reg. (2022). *Türk Gıda Kodeksi Etiketleme ve Tüketicii Bilgilendirme Yönetmeliği*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.

US FDA. (2023). *Draft Guidance for Industry: Labeling of Plant-based Milk Alternatives*. U.S. Food and Drug Administration.

Vanga, S. K., & Raghavan, V. (2018). How well do plant-based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk? *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 10–20.

BÖLÜM 12

BÖLÜM I

Effect of Microencapsulating Mixtures on the Encapsulation Efficiency

Furkan HAYTAOĞLU¹
Zeynep YILDIRIM²
Firuze ERGİN ZEREN³
Ahmet KÜÇÜKÇETİN⁴

1. Introduction

Microencapsulation is a technique that protects bioactive components-present in various forms, such as solid particles, liquid droplets, or gas bubbles-by surrounding them with a microscopic coating layer. The main purpose of this technique is to effectively preserve bioactive components that are sensitive to adverse external factors such as light, temperature, humidity, oxygen, or pH changes (Marcillo-Parra et al., 2021). The microencapsulation of bioactive components such as polyunsaturated fatty acids, antioxidants, vitamins, and probiotics, which are sensitive to environmental factors, is particularly important. These components may lose their stability when exposed to heat, oxygen, or light (Perez-Palacios et

¹ Master's Degree Student, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0009-0001-8854-9895

² Master's Degree Student, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0009-0008-5533-5461

³ Associate Professor, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0000-0002-9751-1020

⁴ Professor, Akdeniz University, Department of Food Engineering, 0000-0002-0132-1581

al., 2022). Microencapsulation methods are generally classified into three main categories: chemical, physicochemical, and physico-mechanical processes. Among these methods are various encapsulation approaches such as spray drying, freeze drying, electrospinning, coacervation, extrusion, co-precipitation, gel formation, emulsion techniques, layer-by-layer coating, fluidized bed coating, and the sol-gel method (Kandasamy & Naveen, 2022).

The extrusion method is widely preferred because it can be carried out effectively and economically under mild conditions, without the need for harmful solvents or advanced technology (Sultana et al., 2022). In the extrusion method, a liquid mixture of core and wall materials (microencapsulating mixture) is passed through a nozzle to form droplets. After, droplets are solidified in solutions containing multivalent cation salts (calcium chloride, aluminum chloride etc.) (Perez-Palacios et al., 2022).

Sodium alginate (SA), which is frequently used as a wall material in the extrusion method, is a natural polysaccharide with a linear structure and is biodegradable, biocompatible, and safe for humans. The gelation mechanism of SA is described as an “egg-box” network structure formed by the replacement of Na^+ ions in the SA chain with Ca^{2+} ions, cross-linking of the chains, and the antiparallel arrangement of two alginate molecules (Yan et al., 2024; Frent et al., 2022). Today, to enhance the gelation performance of alginate, cross-linking studies are conducted not only with natural polymers such as gelatin, carrageenan, cellulose, pectin, gum arabic, and hyaluronic acid, but also with synthetic polymers (polyethylene glycol, polyacrylamide, etc.), as well as proteins and polypeptides (ovalbumin, poly-L-glutamic acid, etc.) (Frent et al., 2022).

When proteins (WP) might be added in foodss due to their high nutritional value and their ability to form gels, emulsions, and foams. WP can form gels and microcapsules through the “cold gelation” method without high temperatures or chemical agents (Wichchukit et al., 2013). The WP/SA mixture exhibits synergistic behavior due to the attractive and repulsive interactions between the two biopolymers. SA forms an “egg-box” structure by cross-linking

with calcium ions, thereby supporting hydrogel formation; Ca^{2+} also triggers the cold gelation of WP. The use of SA together with WP imparts pseudoplastic and viscoelastic properties to the mixtures. (Delanne-Cumenal et al., 2024). Moreover, the viscosity properties of mixture could be affect size and shape of the capsules (Sultana et al., 2022). In this context, SA and various whey protein isolate (WPI) ratios were used in the preparation of microencapsulating mixtures in the present study.

The fluorescence behavior of the rhodamine B dye (RhB) is is affected by environmental factors such as solvent polarity, viscosity, and temperature (Feng et al., 2021), was selected as the model core component. In this study, the aim was to determine the effects of different concentrations of WPI in microencapsulating mixture on the microencapsulation efficiency and capsule morphology.

2. Materials and methods

The sodium alginate (Merck KGaA, Darmstadt, Germany), whey protein isolate (Kavi Food Industry and Trade Co. Ltd., Istanbul, Türkiye) and rhodamine B dye (Merck KGaA, Darmstadt, Germany) used in this study were obtained from the Research Laboratory of the Department of Food Engineering at Akdeniz University.

2.1. Preparation of the microencapsulating mixture

The microencapsulating mixtures containing 1% SA (SA), 1% SA+0.25% WPI (W0.25), 1% SA+0.5% WPI (W0.5), and 1% SA+1% WPI (W1) were prepared. First, SA was dissolved in distilled water to prepare 1% solutions, and then approximately 15 ppm RhB was added.

For the preparation of the microencapsulating mixture, sodium alginate was dissolved in distilled water to obtain a 2.0% (w/v) solution. WPI solutions at concentrations of 0.5, 1.0 and 2.0% were denatured by heating at 81°C for 1 minute. Subsequently, the SA solution was mixed at a 1:1 (w/v) ratio individually with denatured WPI solutions prepared at different ratios, and RhB at a

concentration of ~15 ppm was added. The mixtures were stirred using a magnetic stirrer (WiseStir MSH-20A, Witeg Labortechnik FH GmbH, Wertheim, Germany) at 1600 rpm, 25°C, for 10 minutes. Then, microencapsulation mixtures were stored at 4±1°C for 24 hours to complete the pre-stabilization stage (Ergin, 2019).

2.1.1. Determination of viscosity values and RhB concentration of the microencapsulating mixture

The viscosity values of the microencapsulating mixture were determined using a Brookfield viscometer (DV II+ Pro, Brookfield Engineering Laboratories Inc., Middleboro, MA, USA), following the method reported by Hökelekli et al. (2024).

To determine the concentration of RhB in the microencapsulating mixture The mixtures were mixed with methanol at a 1:2 ratio. Then, the extracted RhB samples were diluted with distilled water at a 1:15 ratio. The absorbance values of the diluted samples were measured using a UV-Vis spectrophotometer (Genesys 10UV, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) (Perea-Flores et al., 2023).

2.2. Microencapsulation of the RhB

The RhB microencapsulation was carried out with some modifications according to the method described by Tanganurat (2020). RhB was encapsulated using the ionotropic gelation method with a Harvard Apparatus Model peristaltic pump (Holliston, MA, U.S.A.). The mixtures were extruded dropwise into a sterile 1 M CaCl₂ using a 5 mm needle. The capsules stirred in the CaCl₂ solution for 30 minutes using a magnetic stirrer. At the end of the stirring period, the capsules separated from the CaCl₂ solution by filtration using Whatman No. 1 filter paper. The capsules and filtrate collected in separate amber bottles and stored at 4±1°C overnight for use in subsequent analyses.

2.2.1. Determination of encapsulation efficiency

To determine the encapsulation efficiency, the concentration of RhB in the capsules and CaCl₂ solution was measured with some modifications to the methods described by Ergin (2019) and Perea-

Flores et al. (2023). For the extraction of RhB present in the CaCl₂ solution, 5 mL of CaCl₂ was treated with methanol at a 1:2 ratio and stirred for 2 minutes using a magnetic stirrer. The liquid phase was transferred into Falcon tubes and centrifuged at 7500 rpm and 25°C for 8 minutes (Hermle Labortechnik GmbH, Wehingen, Germany). The supernatant was diluted 1:30 with distilled water, and the concentration of RhB remaining in the CaCl₂ solution was determined at 547 nm using a UV-vis spectrophotometer.

The concentration of RhB in the capsules was determined by weighing 1 g of the capsules and mixing them with an opening solution (50 mM sodium citrate, 200 mM sodium hydrogen carbonate, and 50 mM Tris-HCl (pH 7.5)) at a ratio of 1:9, along with methanol at a ratio of 1:2, followed by incubating at 37°C to dissolve the capsules (Ergin, 2019). The obtained liquid was then transferred to Falcon tubes and centrifuged at 7500 rpm, 25°C, for 8 minutes. The upper phase was measured at 547 nm using a UV-vis spectrophotometer to determine the amount of RhB in the capsules (Perea-Flores et al., 2023).

2.2.2. Determination of capsule surface area and perimeter

The size (surface area and perimeter) of the capsules were determined using ImageJ, an open-source image analysis software (version 1.41; Rasband, WS, National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA) (Perea-Flores et al., 2023).

3. Results and discussion

The viscosity values of the microencapsulating mixture increased as the WPI was raised in the mixtures. The W1 mixture exhibited the highest viscosity value (20.00 ± 0.33 mPa·s).

Table 1. Viscosity values of the microencapsulating mixture

Microencapsulating mixtures	Viscosity (mPa·s)
SA	17.50 ± 0.33
W0.25	18.50 ± 0.34
W0.5	19.00 ± 0.32
W1	20.00 ± 0.33

The amount of RhB was determined in the microencapsulating mixture, capsules, and CaCl₂ solution. The initial RhB concentration was kept constant in all microencapsulating mixtures (13.24 ± 0.18 ppm), allowing a direct comparison of the encapsulation efficiency. The encapsulation efficiency ranged from 50.74% to 79.00% (Table 2). The encapsulation efficiency increased with the amount of protein in the microencapsulating mixture. In a study conducted by Shao et al. (2019) reported that when proteins were used together with maltodextrin (MD) as microencapsulating mixture for the encapsulation of *Ganoderma lucidum* polysaccharides, encapsulation efficiency (EE) values were higher than when only MD was used. This result observes that the addition of protein to the mixtures can enhance the encapsulation performance of maltodextrin.

In particular, the W1 sample achieved the highest encapsulation efficiency (79.00%) with a RhB content of 10.46 ± 0.30 ppm. The RhB was largely retained within the capsule matrix, with only a very small amount (2.78 ± 0.24 ppm) leaking into the CaCl₂ solution. In contrast, the W0.25 sample had the lowest efficiency at 50.74%, suggesting that the capsule structure in this case may have higher permeability or insufficient gel formation. Moreover, an increase in viscosity stabilizes the capsule structure, allowing the core phase to be more effectively retained within the polymer matrix. Therefore, it can be concluded that there is a direct positive correlation between viscosity and encapsulation efficiency.

Table 2. Encapsulation efficiency of RhB

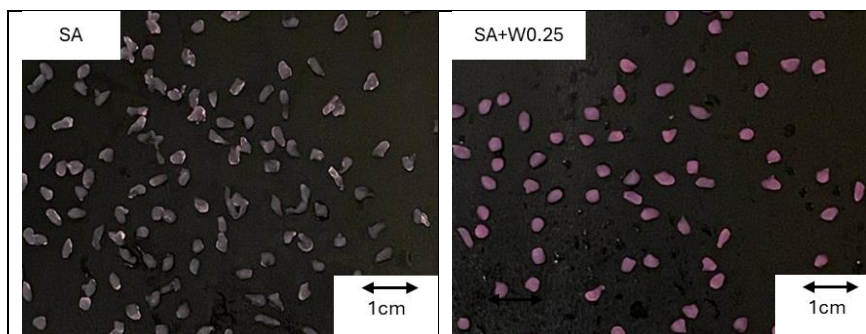
Microencapsulating mixtures	RhB in capsules (ppm)	RhB in CaCl ₂ Solution (ppm)	Encapsulation Efficiency (%)
SA	6.72 ± 0.16	6.52 ± 0.12	50.74
W0.25	7.60 ± 0.24	5.64 ± 0.19	57.40
W0.5	9.18 ± 0.21	4.06 ± 0.17	69.33
W1	10.46 ± 0.30	2.78 ± 0.24	79.00

The capsules produced with W1 mixture had the lowest surface area ($5.33 \pm 0.94 \text{ mm}^2$) and perimeter ($9.30 \pm 0.95 \text{ mm}$). The surface area and perimeter values were adversely correlated with encapsulation efficiency.

Table 3. Surface area and perimeter of the capsules

Microencapsulating mixtures	Surface Area (mm^2)	Perimeter (mm)
SA	7.23 ± 0.98	11.81 ± 0.96
W0.25	6.73 ± 0.95	10.67 ± 0.96
W0.5	6.18 ± 0.88	9.91 ± 0.92
W1	5.33 ± 0.94	9.30 ± 0.95

Figure 1 showed that the capsule produced with W1 mixture had smoother and more compact structure. Smaller surface area and perimeter values indicate that the system forms a denser gel matrix, thereby limiting the diffusion of the RhB. In the literature, a study by Dehkordi et al. (2020) investigated the encapsulation of *Lactobacillus acidophilus* using alginate-whey protein isolate (AL-WPI) and found that AL microcapsules exhibited a broader particle size distribution compared to AL-WPI microcapsules. Incorporating WPI into the alginate solution promoted a more uniform particle size distribution. This finding suggests that using an alginate-protein combination in appropriate proportions can significantly enhance encapsulation performance.



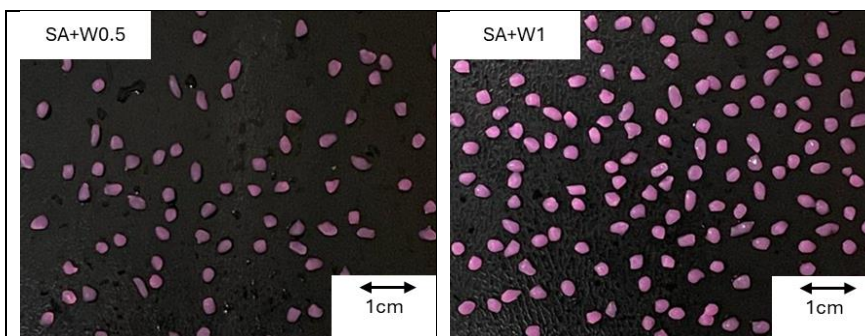


Figure 1. Reel-scale images of the microcapsules

4. Conclusions

The sodium alginate-whey protein isolate mixtures plays a important role in the formation of the microcapsule structure. Increasing the protein content in the mixtures improved the viscosity values of the microencapsulating mixture, supporting the formation of a more integrated and compact capsule wall. This structure limited the diffusion of the RhB from the capsules, increasing its retention and, consequently, enhancing encapsulation efficiency. However, structures containing only alginate exhibited a looser network, resulting in weaker stability. These findings demonstrate that polysaccharide-protein interactions are critically important in microencapsulation processes and that their appropriate use can significantly enhance encapsulation performance.

5. References

- Dehkordi, S. S., Alemzadeh, I., Vaziri, A. S., & Vossoughi, A. (2020). Optimization of alginate-whey protein isolate microcapsules for survivability and release behavior of probiotic bacteria. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190(1), 182-196, <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03071-5>.
- Delanne-Cuménal, A., Laine, E., Hoffart, V., Verney, V., Garrait, G. & Beyssac, E. (2024). Effect of Molecules' Physicochemical Properties on Whey Protein/Alginate Hydrogel Rheology, Microstructure and Release Profile. *Pharmaceutics*, 16(2), 258, <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16020258>.

Ergin, F. (2019). *Bakteriyofaj mikrokapsülasyonunun optimizasyonu ve mikrokapsüle Bakteriyofajın yoğurt üretiminde kullanım olanaklarının araştırılması*, Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye.

Feng, Y., Liu, W., Mercadé-Prieto, R. & Chen, X. D. (2021). Dye-protein interactions between Rhodamine B and whey proteins that affect the photoproperties of the dye. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 408, 113092, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.113092>.

Frent, O. D., Vicas, L. G., Duteanu, N., Morgovan, C. M., Jurca, T., Pallag, A., Muresan, M. E., Filip, S. E., Lucaciu, L. R. & Marian, E. (2022). Sodium alginate-natural microencapsulation material of polymeric microparticles. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), 12108, <https://doi.org/10.3390/ijms232012108>.

Hökelekli, Ç., Ergin, F. & Küçükçetin, A. (2024). Incorporation of encapsulated yoghurt bacteria into stirred yoghurt to improve their survival in an *in vitro* digestive conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 17(3), 747-766, <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03161-7>.

Kandasamy, S. & Naveen, R. (2022). A review on the encapsulation of bioactive components using spray-drying and freeze-drying techniques. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14059, <https://doi.org/10.1111/jfpe.14059>.

Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D. S., González, Z. & Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application–A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 11-23, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.009>.

Perea-Flores, M. D. J., Aguilar-Morán, H. F., Calderón-Domínguez, G., García-Hernández, A. B., Díaz-Ramírez, M., Romero-Campos, H. E., De Jesús Cortés-Sánchez, A. & Salgado-Cruz, M. D. L. P. (2023). Entrapment efficiency (EE) and release mechanism of rhodamine b encapsulated in a mixture of chia seed mucilage and

sodium alginate. *Applied Sciences*, 13(2), 1213, <https://doi.org/10.3390/app13021213>.

Perez-Palacios, T., Ruiz-Carrascal, J., Solomando, J. C., De-la-Haba, F., Pajuelo, A. & Antequera, T. (2022). Recent developments in the microencapsulation of fish oil and natural extracts: procedure, quality evaluation and food enrichment. *Foods*, 11(20), 3291, <https://doi.org/10.3390/foods11203291>.

Shao, P., Xuan, S., Wu, W., & Qu, L. (2019). Encapsulation efficiency and controlled release of *Ganoderma lucidum* polysaccharide microcapsules by spray drying using different combinations of wall materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 962-969, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.153>.

Sultana, M., Chan, E. S., Pushpamalar, J. & Choo, W. S. (2022). Advances in extrusion-dripping encapsulation of probiotics and omega-3 rich oils. *Trends in Food Science & Technology*, 123, 69-86, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.03.006>.

Tanganurat, P. (2020). Probiotics encapsulated fruit juice bubbles as functional food product. *GEOMATE Journal*, 19(72), 145-150, <https://doi.org/10.21660/2020.72.5640>.

Wichchukit, S., Oztop, M. H., McCarthy, M. J. & McCarthy, K. L. (2013). Whey protein/alginate beads as carriers of a bioactive component. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 66-73, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.02.013>.

Yan, P., Lan, W. & Xie, J. (2024). Modification on sodium alginate for food preservation: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104217, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104217>.

