

Fonksiyonel Gıdalar ve Biyoaktif Maddeler: Yenilikler ve Uygulamalar

Editör: Hasan Ufuk Çelebioğlu



Fonksiyonel Gıdalar ve Biyoaktif Maddeler: Yenilikler ve Uygulamalar

Editör:

Hasan Ufuk Çelebioğlu



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozgur yayinlari.com

✉ info@ozgur yayinlari.com

Fonksiyonel Gıdalar ve Biyoaktif Maddeler: Yenilikler ve Uygulamalar

Editör: Hasan Ufuk Çelebioğlu

Language: Turkish

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8554-52-6

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1043>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Çelebioğlu, H. U. (ed) (2025). *Fonksiyonel Gıdalar ve Biyoaktif Maddeler: Yenilikler ve Uygulamalar*.

Özgür Publications. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1043>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozgur yayinlari.com/>



Önsöz

Değerli Okuyucular,

Elinizdeki bu kitap, fonksiyonel gıdalar ve biyoaktif maddeler alanındaki son gelişmeleri ve uygulamaları ele almayı amaçlayan kapsamlı bir kaynaktır. Fonksiyonel gıdalar, temel besin ihtiyacının ötesine geçerek sağlık yararları sağlayan ve hastalık risklerini azaltmaya yardımcı olan gıdalardır. Biyoaktif maddeler ise gıdalarda doğal olarak bulunan ya da işleme sırasında eklenen, sağlık üzerinde biyolojik etkiler gösteren bileşiklerdir. Bunlara örnek olarak fenolik bileşikler, peptidler, flavonoidler veya yeşil yöntemlerle sentezlenmiş nanopartiküller verilebilir.

Kitabımız, fonksiyonel gıdaların ve biyoaktif bileşenlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini, mekanizmalarını ve kullanım potansiyellerini incelemeyi hedeflemektedir. Aynı zamanda, bu alandaki yenilikçi yaklaşımları, teknolojik gelişmeleri ve karşılaşılan zorlukları tartışarak gelecekteki araştırmalar için bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır.

Kitabımız, fonksiyonel gıda kavramını temel bilgilerden başlayarak mikrobiyota, prebiyotikler, probiyotikler ve postbiyotiklerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Ayrıca fenolik bileşikler gibi biyoaktif maddelerin sağlık faydaları, fermente gıdaların fonksiyonel özellikleri ve nanopartiküller ile nanoteknolojinin bu alandaki rolü gibi konulara odaklanmaktadır.

Bu kitabın, gıda mühendisliği, beslenme ve diyetetik, biyoteknoloji ve ilgili sağlık bilimleri alanlarındaki öğrenciler, akademisyenler ve endüstriyel Ar-Ge profesyonelleri için değerli bir kaynak olacağına inanıyorum. Ayrıca, sağlıklı yaşam ve bilinçli beslenmeye ilgi duyan her okurun, sofrasındaki gıdanın artık sadece bir “yiyecek” değil, aynı zamanda bir “sağlık aktivatörü” olabileceği gerçeğini keşfetmesine aracılık edeceğini umuyorum. Hem akademik bilgi hem de endüstriyel uygulamalar açısından çok yönlü bir yaklaşım sunarak, fonksiyonel gıdaların ve biyoaktif maddelerin geleceğini şekillendirecek bilgi ve fikirlerin paylaşılmasını hedeflemektedir.

Katkıda bulunan tüm yazarlarımıza ve bu çalışmanın ortaya çıkmasında emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doç. Dr. Hasan Ufuk ÇELEBİOĞLU

İçindekiler

Önsöz	iii
-------	-----

Bölüm 1

Fonksiyonel Gıdalara Giriş	1
<i>Hasan Ufuk Çelebioğlu</i>	

Bölüm 2

Probiyotiklerin ve Prebiyotiklerin İnsan Sağlığındaki Rolü: Mikrobiyotadan Metabolizmaya	11
<i>Sena Davran Bulut</i>	

Bölüm 3

Postbiyotiklerin Fonksiyonel Gıdalardaki Potansiyeli ve Mekanizmaları	27
<i>Seda Nur Erciyes</i>	
<i>Sena Davran Bulut</i>	

Bölüm 4

Fenolik Bileşikler: Fonksiyonel Gıdalardaki Rolü ve Sağlık Faydaları	45
<i>Hilal Yılmaz</i>	

Bölüm 5

Fonksiyonel Gıdalarda Akıllı Sistemler	67
<i>Recep Taş</i>	

Bölüm 6

Fonksiyonel Gıdalarda Nanopartiküllerin Kullanımı: Fırsatlar ve Zorluklar	87
<i>Nilay Akkus Taş</i>	

Fonksiyonel Gıdalara Giriş

Hasan Ufuk Çelebioğlu¹

Özet

Fonksiyonel gıdalar, temel beslenmenin ötesine geçerek sağlığı iyileştirici veya hastalık riskini azaltıcı kanıtlanmış etkileri olan ürünler olarak tanımlanır. Bu kavram, modern anlamda 1980’lerde Japonya’nın öncülük ettiği FOSHU (Özel Sağlık Gıdaları) sistemiyle şekillenmiştir. Günümüzde ise probiyotikler, polifenoller, omega-3 yağ asitleri, diyet lifleri ve bitki steroller gibi çok çeşitli biyoaktif bileşenler üzerinden incelenmektedir. Bu alandaki düzenleyici yaklaşımlar, Avrupa Birliği, ABD ve Türkiye örneklerinde görüldüğü gibi bölgeden bölgeye farklılık gösterse de, ortak nokta sağlık beyanlarının bilimsel kanıtlara dayanma zorunluluğudur. Fonksiyonel gıdaların önündeki en önemli zorluklar arasında tüketiciler tarafından kabul görmesi, pazar dinamikleri ve bu bileşenlerin vücutta kullanılabilirliği gibi konular yer alır. Bu alan, kişiselleştirilmiş beslenme, nanoteknoloji uygulamaları ve sürdürülebilir biyokaynaklara yönelim gibi gelecek vaat eden eğilimlerle hızla gelişmeye devam etmektedir.

1. Giriş ve Tarihsel Perspektif

Son yıllarda, küresel sağlık ve beslenme alanında yaşanan düşünce değişimi, gıdaların rolünü temel beslenme ihtiyaçlarının ötesine taşımıştır. Artık tüketiciler, gıdaların sadece açlığı gidermek veya temel besin öğelerini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda sağlığı geliştirici, performansı artırıcı ve hastalık risklerini azaltıcı işlevlere de sahip olmasını talep etmektedir. Bu talep, “fonksiyonel gıdalar” olarak adlandırılan ve gıda bilimi, beslenme, tıp ve biyoteknoloji disiplinlerini bir araya getiren dinamik bir araştırma ve geliştirme alanının doğmasına ve hızla büyümesine öncülük etmiştir. Fonksiyonel gıdalar, vücuda temel besin öğelerini sağlamanın yanı sıra, sağlığı geliştirici, hastalık riskini azaltıcı veya bir veya daha fazla vücut fonksiyonunu iyileştirici ek faydalar sunan gıdalar olarak tanımlanmaktadır.

1 Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, ufukcelebioglu@gmail.com, 0000-0001-7207-2730

(Roberfroid, 2000). Bu gıdalar, modern gıda biliminin, tıbbın ve beslenme biliminin kesişim noktasında yer alarak, bireylerin yaşam kalitesini artırma potansiyeli taşımaktadır.

Fonksiyonel gıda kavramı, yeni bir fikir olmamakla birlikte, bilimsel temelleri ve ticarileşme süreci nispeten yenidir. Antik Çağ'da, Hipokrat'ın "Besinler ilacınız, ilacınız besininiz olsun" sözü, gıda ve sağlık arasındaki ayrılmaz bağın erken bir kanıtıdır. Geleneksel tıp sistemlerinde (örneğin, Ayurveda veya Geleneksel Çin Tıbbı) sarımsak, zencefil, zerdeçal gibi birçok gıdanın belirli rahatsızlıkları iyileştirici özellikleri uzun süredir kullanılmaktadır. Ancak, bu sezgisel kullanımların modern bilim ışığında kanıtlanması ve sistematize edilmesi 20. yüzyılın sonlarında gerçekleşmiştir (Roberfroid, 2000).

Modern anlamda fonksiyonel gıdaların ortaya çıkışı, 1980'lerde Japonya'da başlatılan ve dünyada bir ilk olan "Özel Sağlık Amaçlı Gıdalar" (Food for Specified Health Uses - FOSHU) sistemine dayanmaktadır. Japon hükümeti, yaşlanan nüfusun sağlık harcamalarını kontrol altına almak ve yaşam kalitesini yükseltmek amacıyla, bilimsel olarak kanıtlanmış sağlık yararları olan gıdaları resmi olarak tanıma ve onaylama sürecini başlattı (Arai, 1996). Bu hamle, sadece Japonya'da değil, tüm dünyada fonksiyonel gıda pazarının ve araştırmalarının hızla gelişmesi için katalizör görevi gördü. Japonya'yı, Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve diğer gelişmiş ülkelerdeki benzer düzenleyici girişimler izlemiştir.

Bu bölüm, fonksiyonel gıdaların temel tanımlarını, tarihsel gelişimini, sınıflandırılmasını ve düzenleyici çerçevelerini genel hatlarıyla ele almayı amaçlamaktadır. Ayrıca, fonksiyonel gıdaların sağlık üzerindeki etkilerini genel hatlarıyla inceleyerek, kitabın ilerleyen bölümlerinde derinlemesine tartışılacak olan probiyotikler, postbiyotikler, fenolik bileşikler ve nanoteknoloji uygulamaları gibi konulara bir zemin hazırlamaktadır.

2. Fonksiyonel Gıdaların Tanımı ve Kapsamı

Fonksiyonel gıdalar için dünya çapında tek ve kesin bir tanım bulunmamaktadır. Bu durum, farklı ülkelerin kültürel, beslenme alışkanlıklarına ve düzenleyici otoritelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Ancak, çeşitli otoriteler tarafından yapılan tanımlar ortak temalar içermektedir.

En kabul görmüş tanımlardan birine göre, fonksiyonel gıdalar, "temel besleyici değerine ek olarak, bir veya daha fazla hedef fonksiyonu olumlu yönde etkileyerek, sağlığı geliştirici veya hastalık riskini azaltıcı etkiler

gösteren, gıda benzeri bir ürün” olarak ifade edilmektedir (Roberfroid, 2000). Bu tanımın üç kritik unsuru vurgulamaktadır:

1. **Gıda Formunda Olma:** Fonksiyonel gıdalar, geleneksel gıda formunda tüketilmelidir. Haplar, kapsüller veya tozlar gibi takviye edici gıda formları bu kategoride değerlendirilmez.
2. **Besleyici Değerin Ötesinde Fayda:** Temel besin öğelerinin sağladığı faydanın ötesinde, ek ve kanıtlanmış bir sağlık yararı sağlamalıdır.
3. **Normal Diyetin Parçası Olarak Tüketim:** Etkileri, günlük normal beslenme düzeni içinde makul miktarlarda tüketildiğinde ortaya çıkmalıdır.

Fonksiyonel gıdalar, kökenlerine ve üretim yöntemlerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir:

- **Doğal Olarak Zengin Gıdalar:** Belirli bir biyoaktif bileşeni doğal olarak yüksek seviyelerde içeren gıdalardır. Örnek olarak, omega-3 yağ asitleri bakımından zengin yağlı balıklar (somon), antioksidan lutein içeren ıspanak veya yüksek lif içeriğine sahip tam tahıllar verilebilir.
- **Zenginleştirilmiş Gıdalar:** Üretim sürecinde, orijinal formunda bulunmayan veya düşük miktarda bulunan bir veya daha fazla biyoaktif bileşenin (vitamin, mineral, probiyotik, lif, fitosterol vb.) ilave edildiği gıdalardır. Kalsiyum ile zenginleştirilmiş soya sütü, D vitamini ile zenginleştirilmiş süt veya probiyotik kültürlerle fermente edilmiş yoğurt bu sınıfa girer.
- **Değiştirilmiş Gıdalar:** Bileşimi, istenmeyen bir bileşenin (doymuş yağ, şeker, tuz vb.) uzaklaştırılması veya azaltılması, ya da bir biyoaktif bileşenin miktarının artırılması amacıyla biyoteknolojik, ıslah veya özel yetiştirme teknikleriyle değiştirilmiş gıdalardır. Örnek olarak, likopen içeriği yüksek olacak şekilde geliştirilmiş domatesler veya oleik asit içeriği artırılmış ayçiçek yağı gösterilebilir (Hasler ve Brown, 2009).
- **Sentetik veya Yeni Nesil Gıdalar:** Gıda mühendisliği ve nanoteknoloji gibi ileri teknolojiler kullanılarak, biyoyararlılığı ve etkinliği optimize edilmiş biyoaktif bileşen taşıyıcı sistemler içeren gıdalardır. Nanoenkapsüle edilmiş omega-3 yağ asitlerinin ekmek veya meyve suyuna eklenmesi bu türe örnek teşkil eder.

3. Fonksiyonel Gıdaların Temel Bileşenleri: Biyoaktif Maddeler

Fonksiyonel gıdaların sağlık üzerindeki olumlu etkileri, içerdikleri “biyoaktif maddeler” veya “biyoaktif bileşenler” aracılığıyla gerçekleşir.

Biyoaktif maddeler, gıdalarda doğal olarak bulunan veya sonradan ilave edilen, vücutta fizyolojik, metabolik veya hücresel düzeyde faydalı etkiler gösteren, farmakolojik olmayan bileşikler olarak tanımlanır (Kris-Etherton vd., 2002). Bu bileşenler, genellikle düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen, güçlü biyolojik aktivitelere sahiptir.

Başlıca biyoaktif bileşen kategorileri ve sağlık üzerindeki potansiyel etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Probiyotikler, Prebiyotikler ve Sinbiyotikler:** Probiyotikler, yeterli miktarda alındığında konakçı sağlığı üzerinde olumlu etki gösteren canlı mikroorganizmalardır (örn., *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* türleri). Prebiyotikler ise, bağırsaktaki faydalı bakterilerin gelişimini ve/veya aktivitesini seçici olarak teşvik eden, sindirilemeyen gıda bileşenleridir (örn., inülin, fruktooligosakkaritler). Sinbiyotikler ise probiyotik ve prebiyotiklerin bir arada bulunduğu ürünlerdir. Bu üçlü, bağırsak mikrobiyotasının dengesini (disbiyozisi düzelterek) iyileştirerek, sindirim sağlığını destekler, bağışıklık fonksiyonunu güçlendirir ve hatta akıl sağlığı üzerinde etkili olabilir (Gibson vd., 2017).
- **Polifenoller ve Flavonoidler:** Bitkilerde yaygın olarak bulunan bu bileşikler, güçlü antioksidan ve antienflamatuar özelliklere sahiptir. Yeşil çaydaki kateşinler, üzüm ve yer fıstığındaki resveratrol, soya ürünlerindeki izoflavonlar ve yaban mersinindeki antosiyaninler bu gruba örnektir. Kardiyovasküler hastalıklar, belirli kanser türleri ve nörodejeneratif hastalıklar üzerinde koruyucu etkileri olabileceği düşünülmektedir (Pandey ve Rizvi, 2009).
- **Omega-3 Çoklu Doymamış Yağ Asitleri:** Özellikle EPA (eikosapentaenoik asit) ve DHA (dokosaheksaenoik asit) gibi uzun zincirli omega-3 yağ asitleri, somon, uskumru gibi yağlı balıklarda ve bazı mikroalglerde bulunur. Kan lipid profilini iyileştirerek, kan basıncını düşürerek, antienflamatuar etki göstererek ve nörolojik gelişimi destekleyerek kardiyovasküler ve beyin sağlığına katkıda bulunur (Calder, 2015).
- **Diyet Lifi:** Suda çözünür (pektin, beta-glukan) ve çözünmez (lignin, selüloz) lifler olarak ikiye ayrılır. Bağırsak sağlığını destekler, kabızlığı önler, kan şekeri düzenlenmesine yardımcı olur ve LDL kolesterol seviyelerinin düşürülmesine katkı sağlar.
- **Bitki Sterolleri ve Stanoller:** Bitkilerde bulunan ve yapısal olarak kolesterole benzeyen bu bileşikler, ince bağırsakta kolesterol emilimini rekabetçi bir şekilde inhibe eder. Bu sayede, kan LDL kolesterol

seviyelerinin düşürülmesinde etkilidirler ve genellikle margarin, yoğurt gibi gıdalarla zenginleştirilirler (Gylling vd., 2014).

- **Biyoaktif Peptitler:** Süt, yumurta, balık ve bitkisel proteinlerin hidrolizi sonucu açığa çıkan spesifik protein fragmanlarıdır. ACE (anjiyotensin dönüştürücü enzim) inhibitörü aktivite göstererek antihipertansif etki, antimikrobiyal etki ve antioksidan etki gösterebilirler (Sánchez ve Vázquez, 2017).

4. Fonksiyonel Gıdaların Düzenlenmesi, Mevzuat ve Sağlık Beyanları

Fonksiyonel gıdaların pazara sunulması, doğrudan sağlıkla ilişkili iddiaları içerdiği için, geleneksel gıdalara kıyasla çok daha sıkı bir düzenleyici denetime tabidir. Temel amaç, tüketicileri yanıltıcı veya kanıtlanmamış iddialardan korumak ve kamu sağlığını güvence altına almaktır. Bu nedenle, fonksiyonel bir gıdanın etiketinde yer alabilecek herhangi bir sağlık beyanı, genellikle düzenleyici otoriteler tarafından önceden değerlendirilmiş ve onaylanmış olmalıdır.

Küresel anlamda, bu konuda öne çıkan iki ana düzenleyici model bulunmaktadır:

- **Avrupa Birliği Modeli (EFSA):** AB’de, 1924/2006 sayılı “Beslenme ve Sağlık Beyanları Yönetmeliği” bu alandaki temel düzenlemeyi oluşturur (EC, 2006). Bu yönetmeliğe göre, bir sağlık beyanının kullanılabilmesi için, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) tarafından bilimsel olarak değerlendirilmiş ve Avrupa Komisyonu tarafından onaylanmış olması gerekmektedir. EFSA, beyanın genel kabul görmüş bilimsel verilerle desteklenip desteklenmediğini, ortalama bir tüketici tarafından anlaşılıp anlaşılamayacağını ve hedef gıdanın beyanla uyumlu olup olmadığını titizlikle inceler. Onaylanan beyanlar, “Sağlık Beyanları Listesi”ne eklenir. Bu sistem, “önceden onay” (pre-approval) prensibiyle işler ve oldukça katıdır.
- **Amerika Birleşik Devletleri Modeli (FDA):** ABD’de, Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından farklı beyan kategorileri tanımlanmıştır. Bunlar:
 - o **Sağlık Beyanları (Health Claims):** Bir gıda veya bileşeni ile bir hastalık veya sağlık durumu arasındaki ilişkiyi tanımlayan beyanlardır. “Kalsiyum, osteoporoz riskini azaltmaya yardımcı olur” gibi. Bunlar için FDA onayı gereklidir.

- o **Yapı/işlev Beyanları (Structure/Function Claims):** Bir besin ögesinin vücudun yapısı veya işlevi üzerindeki etkisini tanımlayan, ancak bir hastalıktan bahsetmeyen beyanlardır. “Kalsiyum güçlü kemikler için gereklidir” gibi. Bu beyanlar için FDA'den ön onay gerekmez, ancak üretici beyanın doğruluğunu ve güvenilir bilimsel verilerle desteklendiğini taahhüt etmek zorundadır.

Türkiye'deki Durum: Türkiye'de, fonksiyonel gıdalara ilişkin düzenlemeler Türk Gıda Kodeksi (TGK) çatısı altında yayınlanmaktadır. “Türk Gıda Kodeksi Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği” ve “Türk Gıda Kodeksi Beslenme ve Sağlık Beyanları Yönetmeliği” bu konudaki temel mevzuatı oluşturur (TGK, 2017). Türkiye'nin düzenlemeleri, özellikle sağlık beyanları konusunda büyük ölçüde Avrupa Birliği mevzuatı ve EFSA'nın bilimsel görüşleri ile uyumludur. Bir sağlık beyanının kullanılabilmesi için, TGK tarafından yayınlanan listede yer alması veya EFSA onaylı olması genel bir gerekliliktir.

Bu düzenleyici karmaşıklık, fonksiyonel gıda geliştirme sürecinin ayrılmaz bir parçasıdır ve üreticiler ile araştırmacılar için hem maliyet hem de zaman anlamında önemli bir zorluk teşkil etmektedir.

5. Pazar Eğilimleri, Tüketici Kabulü ve Zorluklar

Küresel fonksiyonel gıda pazarı, son yıllarda istikrarlı bir büyüme göstermektedir. Bu büyümenin arkasında; artan sağlık maliyetleri, yaşlanan nüfus, kronik hastalıklardaki artış, tüketicilerin sağlık ve wellness konusundaki artan bilinç düzeyi ve medyanın etkisi gibi faktörler yer almaktadır. Probiyotik içeren süt ürünleri, omega-3 ile zenginleştirilmiş ürünler, enerji verici içecekler ve bitkisel sterol içeren yayımlar pazarın önde gelen ürün segmentlerini oluşturmaktadır.

Ancak, tüketici kabulü hala önemli bir engel olarak karşımıza çıkabilmektedir. Tüketiciler, fonksiyonel gıdaların tadı, fiyatı ve güvenilirliği konusunda hassastır. Bir ürünün geleneksel lezzet profilini olumsuz etkilemesi, tüketici kabulünü düşüren en önemli faktörlerden biridir. Ayrıca, tüketicilerin bir kısmı “doğal” gıdalara yönelirken, “işlenmiş” veya “zenginleştirilmiş” gıdalara karşı temkinli yaklaşabilmektedir. Bu nedenle, ürün geliştirme aşamasında duyuşal özelliklerin optimize edilmesi ve tüketiciye yönelik şeffaf ve anlaşılır iletişim stratejileri büyük önem taşımaktadır.

Sektörün karşı karşıya olduğu diğer zorluklar şunlardır:

- **Bilimsel Kanıt Eksikliği:** Birçok biyoaktif bileşen için, etki mekanizmalarını ve uzun vadeli etkilerini netleştirmek üzere daha fazla sayıda, yüksek kaliteli insan klinik çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır.
- **Biyoyararlılık ve Stabilité:** Birçok biyoaktif bileşen, gıda işleme, depolama ve sindirim süreçleri sırasında stabilitesini kaybedebilir veya vücutta düşük biyoyararlılığa sahip olabilir.
- **Etik ve İletişim Sorunları:** Tüketicileri yanıltmadan, bilimsel olarak kanıtlanmış faydaları etkili bir şekilde iletmek önemli bir zorluktur.

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Fonksiyonel gıdalar, koruyucu sağlık yaklaşımı ve kişisel sağlık yönetimi çağında giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel gıda ve ilaç endüstrileri arasındaki boşluğu doldurarak, bireylerin sağlıklı yaşam tarzlarına aktif olarak katılmaları için yeni fırsatlar sunmaktadır.

Gelecekteki araştırma ve geliştirme trendleri, aşağıdaki yenilikçi alanlara odaklanacaktır:

- **Kişiselleştirilmiş Beslenme:** Bireylerin genetik profili, mikrobiyota kompozisyonu, metabolik durumu ve yaşam tarzına göre “kişiyeye özel” fonksiyonel gıdaların geliştirilmesi, fonksiyonel gıda bilimindeki nihai hedeflerden biridir.
- **İleri Gıda Mühendisliği ve Nanoteknoloji:** Biyoaktif bileşenlerin biyoyararlılığını, stabilitesini ve hedefe yönelik salımını artırmak için nanoenkapsülasyon, emülsiyon teknolojileri ve biyopolimer bazlı taşıyıcı sistemlerin kullanımı yaygınlaşacaktır.
- **Sürdürülebilir Kaynak Arayışı:** Fonksiyonel bileşenlerin, gıda endüstrisi yan ürünlerinden (meyve kabukları, posalar vb.), mikroalglerden veya diğer sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesine yönelik çalışmalar artacaktır. Bu, döngüsel ekonomiye katkı sağlayacaktır.
- **Yeni Biyoaktif Bileşen Keşfi:** Deniz kaynakları, nadir bitkiler ve fermente ürünler gibi geleneksel olarak az araştırılmış kaynaklardan yeni biyoaktif bileşenlerin keşfi devam edecektir.
- **Dijital Sağlık ile Entegrasyon:** Fonksiyonel gıda tüketimi ile kişisel sağlık verilerinin (giyilebilir teknolojiler, mobil uygulamalar) entegre edildiği dijital platformlar önem kazanacaktır.

Sonuç olarak, fonksiyonel gıdalar disiplinler arası iş birliğinin en canlı örneklerinden biridir. Gıda bilimciler, beslenme uzmanları, tıp doktorları, moleküler biyologlar ve mühendislerin ortak çalışması, bu alandaki yeniliklerin temelini oluşturmaktadır. Sağlam bilimsel kanıt, şeffaf iletişim, etik pazarlama ve akılcı düzenlemelerle desteklendiği takdirde, fonksiyonel gıdalar, gelecek nesillerin daha sağlıklı yaşam sürmesine katkıda bulunmak için muazzam bir potansiyel taşımaktadır. Bu kitabın devamındaki bölümler, bu geniş ve heyecan verici alanın farklı boyutlarını daha detaylı bir şekilde ele almış ve okuyucuya derinlemesine bir kavrayış sunmayı amaçlamıştır.

Kaynakça

- Arai, S. (1996). Studies on functional foods in Japan—state of the art. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 60(1), 9-15.
- Calder, P.C. (2015). Marine omega-3 fatty acids and inflammatory processes: Effects, mechanisms and clinical relevance. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1851(4), 469-484.
- EC (European Commission). (2006). Regulation (EC) No 1924/2006 of the European Parliament and of the Council of 20 December 2006 on nutrition and health claims made on foods. *Official Journal of the European Union*, L404, 9-25.
- Gibson, G.R., Hutkins, R., Sanders, M.E., Prescott, S.L., Reimer, R.A., Salminen, S.J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K.S., Cani, P.D., Verbeke, K., Reid, G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology ve Hepatology*, 14(8), 491-502.
- Gylling, H., Plat, J., Turley, S., Ginsberg, H.N., Ellegård, L., Jessup, W., Jones, P.J., Lütjohann, D., Maerz, W., Masana, L., Silbernagel, G., Staels, B., Borén, J., Catapano, A.L., De Backer, G., Deanfield, J., Descamps, O.S., Kovanen, P.T., Riccardi, G., Tokgözoğlu, L., Chapman, M. J. (2014). Plant sterols and plant stanols in the management of dyslipidaemia and prevention of cardiovascular disease. *Atherosclerosis*, 232(2), 346-360.
- Hasler, C.M. ve Brown, A.C., American Dietetic Association (2009). Position of the American Dietetic Association: functional foods. *Journal of the American Dietetic Association*, 109(4), 735-746.
- Kris-Etherton, P.M., Hecker, K.D., Bonanome, A., Coval, S.M., Binkoski, A.E., Hilpert, K.F., Griel, A.E., Etherton, T.D. (2002). Bioactive compounds in foods: their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. *The American Journal of Medicine*, 113(9), 71-88.
- Pandey, K.B., Rizvi, S.I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270-278.
- Roberfroid, M.B. (2000). Concepts and strategy of functional food science: the European perspective. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(6), 1660S-1664S.
- Sánchez, A., Vázquez, A. (2017). Bioactive peptides: A review. *Food Quality and Safety*, 1(1), 29-46.
- TGK (Türk Gıda Kodeksi). (2017). Türk Gıda Kodeksi Gıda Etiketleme ve Tüketicileri Bilgilendirme Yönetmeliği. Resmi Gazete, 29960.

Probiyotiklerin ve Prebiyotiklerin İnsan Sağlığındaki Rolü: Mikrobiyotadan Metabolizmaya 8

Sena Davran Bulut¹

Özet

İnsan bağırsak mikrobiyotası, metabolik denge, bağışıklık düzeni ve intestinal homeostazın korunmasında kritik bir bileşen olarak görev yapmaktadır. Probiyotikler, bağırsak mikrobiyotasını dengeleyerek patojen kolonizasyonunu engeller, bağışıklık sistemini modüle eder ve konak sağlığını desteklerken; prebiyotikler yararlı mikroorganizmaların seçici çoğalmasını teşvik ederek mikrobiyal çeşitliliği artırır. Bu iki bileşenin kombinasyonu olan sinbiyotikler ise sinerjik etki göstererek gastrointestinal ve sistemik sağlık üzerinde ilave faydalar sağlayabilir. Probiyotik ve prebiyotik takviyelerinin biyolojik etkileri; gastrointestinal sistem hastalıkları, pediatrik dönemde atopik dermatit, immün aracılı alerjik reaksiyonlar, solunum yolu enfeksiyonları, obezite ve ilişkili metabolik disfonksiyonlar, kardiyovasküler hastalıklar, nörokognitif süreçler, psikososyal sağlık ve kemik metabolizması gibi geniş bir yelpazede çok sayıda klinik ve deneysel çalışmada incelenmiştir. Bu biyotiklerin, kısa zincirli yağ asitleri gibi mikrobiyal metabolitler aracılığıyla bağırsak ve diğer organlar arasındaki iletişimi modüle ettikleri ve sistemik sağlık üzerinde belirgin etkiler gösterdikleri rapor edilmiştir. Bu bölümde, probiyotiklerin, prebiyotiklerin ve sinbiyotiklerin etki mekanizmaları ile insan sağlığı üzerindeki terapötik ve koruyucu etkileri ele alınmıştır.

1. Giriş

İnsan bağırsakları, gastrointestinal sistemi kolonize eden, insan hücrelerinden daha fazla sayıda bulunan, konak ile simbiyotik ilişki içinde çeşitli faydalar sağlayan ve yeni türlerin yerleşimine karşı direnç gösteren, 1000'den fazla mikroorganizma türünden oluşan karmaşık bir

1 Arş. Gör., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, sdavran@bartin.edu.tr, 0000-0002-8988-3801

ekolojik topluluk olan bağırsak mikrobiyotasına ev sahipliği yapmaktadır. Mikrobiyota; patojenlere karşı savunma, karbonhidratların parçalanması, yağların depolanmasının düzenlenmesi, hayati vitaminlerin sentezi ve bağışıklık sisteminin düzenlenmesi gibi işlevleriyle insan vücudunun çevresel dengesini şekillendiren önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Bu karmaşık mikrobiyal topluluğun dengesinin bozulması (disbiyoz), patojen mikroorganizmaların yeniden yerleşmesine zemin hazırlayarak inflamasyona ve çeşitli hastalıkların ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu durum, bağırsak mikrobiyotasının intestinal homeostazın korunmasında kilit bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Mikrobiyota, bireyde bir kez oluştuktan sonra yaşam boyunca farklı evrelerde çeşitli değişiklikler geçirebilir. Bu değişken yapısına rağmen, mikrobiyotadaki bileşimsel farklılıklar; kronik gastrointestinal hastalıklardan nörolojik bozukluklara kadar pek çok hastalığın oluşum sürecinde kritik bir rol üstlenmektedir. Nitekim günümüzde, bağırsak mikrobiyotasının insan fizyolojisi ve metabolizmasının düzenlenmesinde merkezi bir işlev gördüğünü destekleyen güçlü bilimsel kanıtlar mevcuttur (Olvera-Rosales vd., 2021).

Probiyotik mikroorganizmaların bağırsak mikrobiyotasını düzenleyici etkileri hem insanlarda hem de hayvanlarda çeşitli hastalıkların tedavisinde önemli bir yer edinmelerini sağlamıştır. Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization - FAO) ile Dünya Sağlık Örgütüne (World Health Organization - WHO) göre probiyotikler, belirli miktarlarda alındığında sağlığa fayda sağlayan canlı mikroorganizma suşlarıdır ve bu tanım Uluslararası Probiyotik ve Prebiyotik Bilimsel Derneği (ISAPP) tarafından da kabul edilmektedir. 20. yüzyılın başlarından itibaren, belirli mikroorganizma kombinasyonlarını içeren probiyotik gıdaların önemi giderek artmış ve bu alandaki araştırmalar hem hayvan hem de insan modellerinde yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalar, bağışıklık sistemi, metabolizma ve nöroendokrin fonksiyonlar üzerinde etkili olan çeşitli özgül suşların faydalarını ortaya koymuştur. Probiyotiklerin en önemli yararlarından biri, organizmadaki mikrobiyotanın gelişimini destekleyerek bağırsak homeostazının korunmasına yardımcı olmalarıdır. Böylece, patojenlerle organizmanın sağlıklı işleyişi için gerekli olan yararlı bakteriler arasında dengeli bir mikrobiyal ortamın sürdürülmesini sağlarlar. Bu potansiyel, probiyotik içerikli gıdaların geliştirilmesini ve bağırsak mikrobiyotasının modülasyonuna yönelik araştırmaların artmasını sağlamış; sonuç olarak probiyotiklerin tüketimi teşvik edilmiştir (Oniszcuk vd., 2021).

Bağırsak mikrobiyotasının yapısını ve işlevini etkileyen birçok unsur arasında diyet önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, prebiyotikler özellikle dikkat çekmektedir; çünkü bu besin bileşenleri, bağırsakta yararlı

mikroorganizmaların gelişimini teşvik etme ve bağırsak sağlığını destekleme açısından umut verici etkilere sahiptir (Han vd., 2023). Prebiyotik terimi ilk kez 1995 yılında Glenn R. Gibson ve Marcel Roberfroid tarafından ortaya konmuş olup, bu bileşikler konak sağlığını iyileştirmek amacıyla kalın bağırsakta belirli bakteri türlerinin büyümesini veya aktivitesini seçici olarak teşvik eden, sindirilemeyen besin bileşenleri olarak tanımlanmıştır. 2004 yılında Glenn R. Gibson ve Hollie M. Probert, prebiyotiklerin taşınması gereken üç temel özelliği belirtmiştir: (i) mide asidine, sindirim enzimlerine ve gastrointestinal emilime karşı dirençli olmak; (ii) bağırsak mikroorganizmaları tarafından fermente edilebilmek; (iii) konak sağlığı ile ilişkili yararlı bakterilerin büyüme ve aktivitelerini seçici olarak artırmak. 2016 yılında ise Uluslararası Probiyotik ve Prebiyotik Bilimsel Derneği (ISAPP), prebiyotikleri konak mikroorganizmaları tarafından seçici şekilde kullanılarak sağlık üzerinde olumlu etkiler oluşturan substratlar olarak yeniden tanımlamıştır (Bedu-Ferrari vd., 2022; Yoo vd., 2024). Prebiyotikler, bağırsak mikrobiyotasının bileşimini, bağışıklık yanıtlarını, metabolik yolları ve bağırsak bariyer fonksiyonunu etkileyen karmaşık mekanizmalar aracılığıyla bağırsak sağlığını destekler. İnülin, frukto-oligosakkaritler (FOS) ve galakto-oligosakkaritler (GOS) gibi sindirilemeyen prebiyotik lifler, kolona ulaşarak *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* gibi yararlı bakterilerin besin kaynağı olur. Bu bakterilerin fermentasyonu ile oluşan kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar), bağırsak homeostazını korur ve sistemik faydalar sağlar (Kumari vd., 2024; Marnpae vd., 2024). Prebiyotiklerin tam etki mekanizmalarının anlaşılması, gastrointestinal hastalıkların yanı sıra nörodejeneratif ve metabolik hastalıklar gibi birçok sağlık sorununun önlenmesi ve tedavisinde önemli bir adımdır.

Probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotik takviyeleri, konak bağırsak mikrobiyotasını modüle ederek hem bağırsak sağlığını hem de bağırsak ile ilişkili insan sağlığını etkileyen organların fonksiyonlarını destekleyebilir. Bağırsak mikrobiyotası, özellikle SCFA gibi işlevsel metabolitler üreterek bağırsak ve diğer organlar arasındaki iletişimde merkezi bir rol oynar (Kim ve Mills, 2024). Fiziksel olarak bitişik olmasalar da bağırsak mikrobiyotası epitel ve bağışıklık hücrelerini uyarak uzak dokulara biyokimyasal sinyallerin iletilmesini sağlar; bu sinyaller kan dolaşımı veya sinir yolları aracılığıyla hedef organlara ulaşır. Bu çok yönlü iletişim ağı, bağırsak mikrobiyotası insan fizyolojisi üzerindeki etkilerini güçlendirir (Cani ve Knauf, 2016). Bu bölüm, probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotiklerin etki mekanizmalarını inceleyerek, insan sağlığı üzerindeki rollerini ve hastalıkların önlenmesi ile tedavisindeki fonksiyonlarını deneysel ve klinik çalışmalar ışığında açıklamayı amaçlamaktadır.

2. Probiyotiklerin Etki Mekanizmaları

Probiyotikler, insan fizyolojisinde özellikle sağlıklı bir bağırsak ortamının sürdürülmesinde önemli rol oynayan birçok faydalı sağlık destekleyici işlev gerçekleştirir. Günümüzde en yaygın kullanılan ve sağlık açısından olumlu etkileri bulunan probiyotik suşlar arasında *Enterococcus faecium*, *Bifidobacterium*, *Bacillus*, *Saccharomyces boulardii* (*S. boulardii*), *Lactobacillus* türleri ve *Pediococcus* bulunmaktadır (Roy ve Dhaneshwar, 2023). Bu probiyotiklerin sağladığı yararların moleküler temel mekanizmaları şu şekildedir: (1) Bağırsak mikrobiyotasının düzenlenmesi, (2) Patojenlerin bağlanması önlenmesi, (3) Bağırsak bariyerinin güçlendirilmesi, (4) Bağışıklık sisteminin güçlendirilmesi.

Bağırsak mikrobiyotasının konak organizmanın sağlığı üzerindeki etkisi giderek daha belirgin hale gelmiştir; çünkü mikrobiyota dengesindeki bozulmalar, yani disbiyozis, işlevsel gastrointestinal bozukluklar ile enfeksiyon ve antibiyotik kaynaklı ishal, gıda alerjisi, atopik egzema, inflamatuvar bağırsak hastalığı, irritabl bağırsak sendromu (IBS) gibi alerjik hastalıkların yanı sıra nörodejeneratif ve metabolik hastalıkların gelişiminde de önemli bir rol oynamaktadır. Probiyotiklerin bağırsak mikrobiyotasını düzenleyici etkileri, genellikle bu mikroorganizmaların patojen suşların konak hücrelere tutunma süreçlerini engelleme, bu suşları yerinden etme veya bağlanma sürecine doğrudan müdahale etme yeteneklerine dayanmaktadır. Patojenlerin bağlanmasının probiyotikler tarafından önlenmesi; konak hücre reseptörlerinde sterik engel oluşturma, besin kaynakları ile mukozal bağlanma bölgeleri için rekabet yoluyla dışlama ve bağırsak mukus yapısında değişikliklerin indüklenmesi gibi mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşmektedir (Zhang vd., 2019). Yapılan çeşitli çalışmalar, bazı probiyotik suşların *Clostridium difficile*, *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* ve *Bacteroides vulgatus* gibi patojenlerin bağlanmasını rekabetçi bir şekilde engelleyebildiğini ve bu mikroorganizmaları yerinden edebildiğini ortaya koymuştur (Collado vd., 2006; Lee vd., 2003).

Probiyotiklerin etkinliği, konakçının gastrointestinal sistemi ve bağırsak florasında meydana gelen değişikliklere bağlı olduğu için, bu mikroorganizmaların bağırsakta tutunabilme ve kalıcılık yetenekleri oldukça kritiktir. Bu sebeple probiyotiklerin bağırsak mikrobiyotasını düzenlemesinde kritik rol oynayan diğer mekanizmalardan bir diğeri ise, bakteriosinler, SCFA'lar ve dekonjuge safra asitleri gibi çeşitli antimikrobiyal bileşiklerin sentezidir (Khan vd., 2019). Butirik, propiyonik, laktik ve asetik asitler gibi SCFA'lar, probiyotik bakterilerin karbonhidratları metabolize etmesi sonucu ortaya çıkan maddelerdir ve ince bağırsaktaki pH değerini

düşürerek patojen mikroorganizmaların gelişimini engellerler. Özellikle asetik ve laktik asitler, probiyotikler tarafından üretilen en etkili organik asitler olup, *Enterobacteriaceae* ve *Pseudomonadaceae* ailelerine ait gram-negatif gıda bozulmasına neden olan bakterilere karşı güçlü bir baskılayıcı etki gösterirler. Bu baskı, organik asitlerin iyonize halde patojen hücrelerde birikmesi ve hücre içi pH'nı düşürülmesiyle sağlanır; sonuç olarak hedef bakterilerin ölümü gerçekleşir (Makras vd., 2006).

İnsan vücudundaki en büyük bağışıklık organı olan bağırsak, sağlığın korunmasında hayati bir rol üstlenir. Bağırsak bariyeri; mukus tabakası, epitel hücre katmanı ve lamina propria gibi yapıları içeren çok bileşenli ve dinamik bir savunma sistemidir ve hem dış çevresel etmenlere karşı koruma sağlar hem de epitel dokunun bütünlüğünü destekler (Wang vd., 2021). Bu savunma sisteminin işleyişinde epitel hücreler arasındaki sıkı bağlantılar (tight junctions), mukus üretimi ve antimikrobiyal peptit (AMP) sentezi temel unsurlar arasında yer alır. Bariyer fonksiyonunun bozulması, bakterilerin ve antijenlerin submukozal dokuya geçişine olanak tanıyarak çeşitli bağırsak hastalıklarının ortaya çıkmasına neden olabilir (Oelschlaeger, 2010). Probiyotik mikroorganizmalar, bağırsak ortamına ulaştıklarında, mevcut mikrobiyota ile etkileşime girerek kimyasal, mekanik, biyolojik ve bağışıklık bariyerlerini destekleyici etkiler gösterirler. Bu etkiler kapsamında, probiyotikler bağırsak hücreleriyle etkileşerek bağırsak geçirgenliğini dengelemeyi, mukus sentezini artırmayı, mukozaya yenilenmesini teşvik etmeyi ve hem mukozal bariyerin bütünlüğünü hem de bağırsak mekanik bariyerinin normal işleyişini sürdürmeyi amaçlarlar (Cheng vd., 2020).

Probiyotiklerin en temel işlevlerinden biri, bağışıklık sistemini düzenleyici (immünomodülatör) aktiviteleridir; bu aktiviteler hem inflamasyonun kontrol altında tutulmasını sağlar hem de bağışıklık sistemini uyarıcı (immünostimülatör) etkilere sahiptir (Mazziotta vd., 2023). Yapılan araştırmalar, bazı probiyotik türlerinin bağırsakta yer alan monositler, makrofajlar, T ve B lenfositleri ile doğal öldürücü (NK) hücreler gibi çeşitli bağışıklık hücrelerinin işlevlerini doğrudan ya da dolaylı yoldan etkileyebildiğini ortaya koymuştur (You vd., 2022).

Konak organizmanın bağırsak mukozası yabancı bir antijenle karşılaştığında hem adaptif bağışıklık sistemi hem de inflamatuvar yanıtlar devreye girerek bağışıklık tepkisi başlatılır ve böylece homeostatik denge korunur. İmmünomodülatör özellik gösteren probiyotiklerin, IL-10 üretimini ve düzenleyici T hücrelerinin (Treg) aktivitesini artırarak alerji ve inflamasyon gibi bağışıklık sistemiyle ilişkili semptomları hafifletici etki gösterdiği belirlenmiştir (Dargahi vd., 2019). Ayrıca bu probiyotikler,

B hücrelerini aktive ederek ve sitokin üretimini düzenleyerek bağırsak bariyerinin işlevsel bütünlüğünü desteklemekte ve böylece adaptif bağışıklık yanıtının etkin biçimde başlatılmasına katkı sağlamaktadır. Bu etkilerin kısa süreli probiyotik takviyeleri ile dahi gözlemlenebildiği bildirilmektedir (Miller vd., 2019).

3. Prebiyotiklerin Etki Mekanizmaları

İnsan bağırsaklarında, prebiyotik bileşiklerin polimer yapılarını sindirecek enzimlerin bulunmaması nedeniyle, bu maddeler ince bağırsakta sindirilemeden kalır ve doğrudan kalın bağırsağa ulaşır. Kalın bağırsakta ise prebiyotikler, bağırsak mikrobiyotası tarafından ayrıştırılarak seçici biçimde fermente edilir. Bu fermentasyon süreci sonucunda oluşan ikincil metabolitler ya bağırsak epitel hücreleri tarafından emilir ya da portal ven aracılığıyla karaciğere taşınır (Khan vd., 2019). Bu metabolitler; bağışıklık sisteminin modülasyonu, patojenlere karşı savunma, bağırsak bariyerinin güçlenmesi, mineral emiliminin artması ve kan lipid düzeylerinin düşmesi gibi konak sağlığı üzerinde çeşitli yararlı etkiler gösterebilir. Asetat, bütirat ve propiyonat gibi SCFA'lar, bağırsakta en yaygın şekilde bulunan ve faydalı bakteriler tarafından üretilen metabolitler olup hem bağırsak sağlığının hem de genel vücut dengesinin korunmasında kilit rol oynar (Dai vd., 2021).

Prebiyotiklerin fermentasyonu sonucu oluşan SCFA'lar, bağırsak ortamının pH'ını düşürerek zararlı bakterilerin çoğalmasını engellerken faydalı mikroorganizmaların gelişimini destekler (Roupar vd., 2023). Xie ve arkadaşlarının (2024) yaptığı *in vitro* çalışmada, inülin, laktoz, GOS ve FOS gibi prebiyotik substratların kullanımıyla farklı pH seviyelerinin bağırsak mikrobiyotası ve metabolit üretimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Düşük pH seviyeleri *Bifidobacterium* türlerinin artışına, *Bacteroides* türlerinin ise azalmasına neden olurken; daha yüksek pH koşullarında özellikle inülin ile bütirat üretiminin arttığı ve faydalı bakteri türlerinde zenginleşme gözlemlenmiştir. Bu bulgular, pH seviyesinin mikrobiyota kompozisyonu ve prebiyotiklerin metabolik çıktıları üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Xie vd., 2024). SCFA'lar ayrıca bağışıklık yanıtlarının düzenlenmesinde görev alır; T düzenleyici hücreler gibi immün hücrelerin işlevlerini kontrol ederek bağışıklık toleransını artırabilir. Bu immünomodülatör etki, bağışıklık sisteminin genel işleyişini ve bağırsak dengesini destekler (Fei vd., 2023). Prebiyotiklerin mikrobiyota tarafından fermente edilmesiyle ortaya çıkan kısa zincirli yağ asitleri (özellikle bütirat), hem bağışıklık tepkilerini düzenler hem de kolon epitel hücrelerine enerji sağlayarak bağırsak bariyerinin bütünlüğünü korur. Ayrıca sıkı bağlantı

proteinleri ve müsin üretimini artırarak patojenlerin bağırsak epiteline geçişini engellerler (Peredo-Lovillo vd., 2020).

Prebiyotiklerin öne çıkan bir diğer özelliği ise, faydalı mikroorganizmaların büyümesini teşvik ederek onların zararlı mikroplarla rekabet edebilmesini sağlaması ve faydalı fermentasyon ürünlerinin oluşumunu desteklemesidir. Özellikle inülin, FOS ve GOS gibi prebiyotiklerin bu işlevi etkin biçimde yerine getirdiği bilinmektedir. Ayrıca, prebiyotiklerin sadece sindirim sistemi üzerinde değil, aynı zamanda merkezi sinir sistemi, bağışıklık sistemi ve kardiyovasküler sistem gibi vücudun diğer hayati sistemleri üzerinde de koruyucu etkileri olduğu bildirilmektedir (You vd., 2022).

4. Probiyotik ve Prebiyotiklerin Koruyucu ve Terapötik Etkileri

Probiyotik ve prebiyotik takviyelerinin biyolojik etkileri; gastrointestinal sistem patolojileri, pediatrik dönemde atopik dermatit, immün aracılı alerjik reaksiyonlar, respiratuvar sistem enfeksiyonları, obezite ve ilişkili metabolik disfonksiyonlar, kardiyovasküler morbidite, nörokognitif ve psikososyal sağlık parametreleri ile kemik metabolizmasına ilişkin geniş bir spektrumda ve çok sayıda klinik ile deneysel çalışmada kapsamlı biçimde incelenmiştir.

4.1. Metabolik Hastalıklar

Metabolik sendrom; dislipidemi, hiperglisemi, insülin direnci, oksidatif stres, inflamasyon, hipertansiyon ve nörodejeneratif süreçler gibi klinik ve biyokimyasal göstergelerle tanımlanan, ayrıca obezite, diabetes mellitus, alkolsüz yağlı karaciğer hastalığı (NAFLD) ve osteoartrit gibi çeşitli metabolik patolojilerle yakından ilişkili karmaşık bir bozukluklar topluluğunu ifade etmektedir. Metabolik hastalıkların sıklıkla birbiriyle etkileşimli ilerlediği bilinmektedir; örneğin, obezite tip 2 diyabet gelişimi için başlıca risk faktörlerinden biri olarak kabul edilirken, aşırı vücut ağırlığı NAFLD'nin patogeneğinde önemli rol oynamaktadır (Gowd vd., 2019). Son dönemdeki çalışmalar, bağırsak mikrobiyotasında görülen dengesizliklerin metabolik hastalıkların gelişiminde belirleyici faktörlerden biri olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, mikrobiyal dengenin yeniden sağlanması olası bir terapötik yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Li vd., 2021). Mikrobiyota ile metabolik bozuklukların patogenezi arasındaki etkileşim üç temel mekanizma üzerinden değerlendirilmektedir: birincisi, enerji üretiminde kullanılan karbon substratlarının sağlanması; ikincisi, enerji metabolizmasının düzenlenmesinde rol oynayan belirli gen ve proteinlerin mikrobiyota aracılığıyla modülasyonu; üçüncüsü ise bakteriyel kaynaklı lipopolisakkaritlerin (LPS) plazmaya salınımıdır (Olvera-Rosales vd., 2021). Khanna ve ark., yüksek yağlı diyetle indüklenen metabolik

sendrom modelinde *L. pentosus* GSSK2 ve *L. plantarum* GS26A'nın metabolik parametreleri iyileştirerek, glukoz metabolizmasını düzenleyip oksidatif stresi azalttığını ve bu suşların fonksiyonel gıda olarak potansiyel taşıdığını göstermiştir (Khanna vd., 2020). Başka bir çalışmada ise Çelik ve Ünlü Söğüt yüksek yağlı diyet ile indüklenen obez Wistar sıçanları ile yaptığı çalışmada, probiyotik takviyesinin kilo alımını azalttığını ve açlık plazma glukozu, insülin, HOMA-IR, lipid profili, inflamasyon belirteçleri, leptin ile kemer düzeylerini anlamlı şekilde iyileştirdiğini göstermişlerdir. Bulgular, probiyotiklerin obezite ve ilişkili metabolik bozukluklar üzerinde koruyucu etkiler gösterebileceğini ortaya koymuştur (Çelik ve Ünlü Söğüt, 2019).

Probiyotiklerin yanı sıra prebiyotikler ve sinbiyotiklerin de metabolik hastalıkların önlenmesi ve tedavisinde etkili olduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Liu ve arkadaşları, Tip 2 diyabetli farelerde yaptıkları araştırmada, aralıklı orucun prebiyotiklerle kombinasyonunun dislipidemi ve hepatik/renal parametrelerde iyileşme sağladığını ve bağırsak mikrobiyotasının çeşitlilik ile yapısını yeniden düzenlediğini göstermiştir (Liu vd., 2024). Hassan ve arkadaşlarının 58 obez Mısırlı kadın üzerinde yaptığı çalışmada, düşük kalorili, yeterli lifli diyetle birlikte probiyotik takviyesi ve düzenli egzersizin, vücut kompozisyonunu iyileştirdiğini, serum leptin, ALT ve AST düzeylerini düşürdüğünü ve kilo kaybını desteklediğini belirtmiştir. Ayrıca, bu kombinasyonun bağırsak mikrobiyotasının bileşiminde *Lactobacillus*, *Bifidobacteria* ve *Bacteroidetes*'in artışı ve *Firmicutes/Bacteroidetes* oranında azalma gibi anlamlı değişiklikler sağladığını da göstermişlerdir (Hassan vd., 2024).

4.2. Nörodejeneratif Hastalıklar

Bağırsak-beyin eksen, merkezi sinir sistemi (MSS), otonom sinir sistemi (OSS) ve enterik sinir sistemi (ENS) dahil olmak üzere çift yönlü bir iletişim ağı olarak işlev görür. Bu eksene bağışıklık ve endokrin sistemler ile bağırsak mikrobiyotası da entegre olur. ENS, bağırsak hareketliliği, geçirgenlik, enteroendokrin sinyal iletimi ve mukozal bağışıklık aktivitesini düzenler ve bu işlevler MSS'den bağımsız olarak bağırsak fonksiyonlarını destekler. Bu iletişim, bağırsak mikrobiyotası tarafından üretilen nörotransmitterler ve hormonlar (ör. grelin, leptin) aracılığıyla doğrudan veya dolaylı olarak sağlanır (W. Wu vd., 2020). Son yıllarda yapılan çalışmalar, bağırsak mikrobiyotasındaki disbiyozun Alzheimer, Parkinson, otizm, nörodejeneratif hastalıklar, multipl skleroz, anksiyete ve depresyon gibi nörolojik ve psikiyatrik bozukluklarda kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca çeşitli çalışmalar, bağırsak mikrobiyotasının bağırsak-beyin sistemini etkileyerek, kaygı ve stres durumlarında ortaya çıkan semptomları tetiklediğini

göstermektedir. Parkinson hastalığı fare modelinde, α -sinükleinin (α Syn) beyinden ileuma taşındığı ve ileumdaki α Syn agregatlarının CD11c⁺ hücreler içinde bulunduğu ve böylece α Syn'ın beyin ve bağırsak arasında taşınmasının hücrel mekanizması gösterilmiştir (McFleder vd., 2023).

Deneyssel ve klinik araştırmalar, probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotik desteklerin psikofizyolojik sonuçlar üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu ve nörodejeneratif hastalıklarına önlenmesinde/tedavisinde etkili olabileceğini göstermektedir. Prebiyotikler ve probiyotikler, bağırsak mikrobiyota yapısını şekillendirme ve bunun sonucunda nöroprotektif etkiler gösteren metabolitlerin sentezini etkileme açısından en kapsamlı araştırılan yaklaşımlardan biridir. Sindirilemeyen diyet lifleri gibi prebiyotikler, mikrobiyal fermentasyonda substrat işlevi görerek, antiinflamatuvar ve nöroprotektif özellikler taşıyan SCFA ile diğer metabolitlerin üretimini destekleyen yararlı bakterilerin çoğalmasını teşvik eder (Peterson, 2020). Artan sayıda çalışma, *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* türleri gibi bazı probiyotiklerin de nörolojik sağlık üzerinde faydalı etkiler oluşturan SCFA ve benzeri metabolitlerin üretimini artırabileceğini ortaya koymaktadır. Randomize, çift-kör, plasebo kontrollü çalışmada, seçici serotonin geri alım inhibitörler (SSRI'ler) tedavisine ek olarak verilen *Lactobacillus plantarum* 299v probiyotiğinin majör depresif bozukluk (MDD) hastalarında bilişsel performansı iyileştirdiği ve kynurenin (KYN) düzeylerini anlamlı şekilde azalttığı gösterilmiştir (Rudzki vd., 2019). Probiyotik (*E. faecium*) ve prebiyotik (agave inulini) takviyelerinin orta yaşlı sıçanlarda hafıza üzerine etkileri incelenmiş ve beş haftalık uygulama sonunda, özellikle sinbiyotik grubun mekânsal bellek testlerinde (Morris Water Maze) daha iyi performans sergilediği, proinflamatuvar sitokin düzeylerinin azaldığı, BDNF ve bütirat seviyelerinin ise yükseldiği bulunmuştur. Ayrıca sinbiyotik uygulama, hipokampal sinaptik plastisiteyi güçlendirerek yaşa bağlı bilişsel gerilemeye karşı koruyucu etki gösterdiği rapor edilmiştir (Romo-Araiza vd., 2018). Hemodiyaliz hastalarında probiyotik suşlar ile GOS/FOS karışımından oluşan sinbiyotik kombinasyonunun, Beck Anksiyete İndeksi ve Beck Depresyon İndeksi skorlarında azalma ile ilişkili olduğu ve mental sağlık ile anemi üzerinde olumlu etkiler gösterdiği belirlenmiştir (Haghighat vd., 2021).

4.3. Gastrointestinal Hastalıklar

Son yıllarda, diyet, mikrobiyota ve irritabl bağırsak sendromu (IBS) ile inflamatuvar bağırsak hastalıkları (IBD) gibi gastrointestinal hastalıklar arasındaki ilişki, standartlaştırılmış ve bilimsel yöntemlerin kullanılmasıyla daha net biçimde ortaya konulmaya başlanmıştır. İnsanların mikrobiyota

profilleri büyük farklılıklar göstermekte ve bu çeşitlilik, birçok gastrointestinal hastalıkta farklı derecelerde disbiyoz ile ilişkilendirilmektedir (Guarino vd., 2020). Ülseratif kolit (UC), Crohn hastalığı (CD) ve sınıflandırılmayan inflamatuvar bağırsak hastalığı (IBD-U) gibi IBD türleri, bağırsak mukozasında kronik inflamasyonla seyreden ve çok faktörlü etiyolojiye sahip hastalıklardır. Bağırsak mikrobiyotasındaki değişiklikler hem hastalığın nedeni hem de sonucu olabilmektedir. Antibiyotik kullanımı disbiyoz riskini artırırken, mikrobiyotanın diyet veya probiyotiklerle modifiye edilmesi, tedaviye yönelik umut verici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Akutko ve Stawarski, 2021). IBD hastalarının, geleneksel tedavilere yönelik kaygılar nedeniyle tamamlayıcı ve alternatif tedavilere, özellikle de probiyotiklere ilgisi giderek artmaktadır. Probiyotiklerin, prebiyotiklerin ve sinbiyotiklerin güvenli olduğu ve hem alevlenme hem de remisyon dönemlerinde ek fayda sağlayabileceği düşünülmektedir. Ancak mevcut çalışmaların sınırlı hasta sayıları, farklı müdahale türleri ve standartlaşmamış yöntemler nedeniyle kesin sonuçlara ulaşmak güçtür. Yine de bağırsak mukozasını koruyucu ve immün yanıtları düzenleyici özelliklere sahip uygun probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotik türleri, IBD tedavisinde umut vadeden bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle disbiyozun önlenmesi veya tedavisi ile fonksiyonel gastrointestinal semptomların azaltılmasında probiyotiklerin, prebiyotiklerin ve sinbiyotiklerin potansiyel yararları öne çıkmaktadır. 2023 yılına kadar yapılan randomize kontrollü çalışmaların meta-analizinde 54 probiyotik, 7 prebiyotik/sinbiyotik ve 6 FMT çalışması incelenmiştir. Bulgular, özellikle *Bifidobacterium* ve *Lactobacillus* suşlarını içeren probiyotiklerin IBS semptomlarını anlamlı şekilde iyileştirdiğini göstermiştir (Wu vd., 2024). Murakami ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada IBS hastalarında *Lactobacillus brevis* KB290'ın (KB290) etkilerini değerlendirmiş ve çift kör, plasebo kontrollü çapraz tasarımlı çalışmada KB290 tüketimi, IBS semptomlarında genel bir iyileşme sağlamasa da yaşam kalitesini arttırdığını raporlamışlardır. Ayrıca KB290 kullanımında sulu dışkı ve karın ağrısı sıklığı azalırken, *Bifidobacterium* düzeyi artmış ve *Clostridium* düzeyi azalmıştır. Bulgular, KB290'ın IBS'de erken müdahale için yararlı olabileceğini göstermektedir (Murakami vd., 2012). Başka bir randomize, çift kör, plasebo kontrollü çalışmada, multispecies probiyotiklerin IBS semptomları ve bağırsak mikrobiyotası üzerine etkileri incelenmiştir. Dört haftalık uygulama sonunda, semptomlarında belirgin düzelme yaşayan hasta oranı probiyotik grubunda plaseboya göre anlamlı derecede yüksek bulunmuştur (%68'e karşı %37,5). Karın ağrısı, rahatsızlık ve şişkinlikte iyileşme sadece probiyotik grubunda gözlenmiştir. Ayrıca dışkı analizinde *B. lactis*, *L. rhamnosus* ve *S. thermophilus* düzeyleri probiyotik grubunda artış

göstermiştir (Yoon vd., 2014). Prebiyotiklerin gastrointestinal hastalıklardaki etkisini araştırmak için yapılan bir çalışmada, resveratrolün diyetle alınabilir bir dozda anti-inflamatuvar etkileri araştırılmıştır. Resveratrol, bağırsakta faydalı bakterileri (*Laktobasil* ve *Bifidobakteri*) artırmış, kolon mukozasını korumuş, kilo kaybını, anemi ve inflamasyon belirteçlerini azaltmıştır. Ayrıca prostaglandin E2, COX-2, prostaglandin E sentaz ve nitrik oksit düzeylerini düşürmüş ve kolon mukozasında 2.655 genin ekspresyonunu değiştirmiştir. Bulgular, resveratrolün bağırsak inflamasyonuna karşı diyetle kullanılabilecek faydalı bir bileşik olduğunu göstermektedir (Larrosa vd., 2009). Steed ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Crohn hastalığı olan hastalarda sinbiyotik kullanımının etkileri araştırılmıştır. Çift kör, plasebo kontrollü randomize bir çalışmada, *Bifidobacterium longum* ve prebiyotik Synergy 1 içeren sinbiyotik, 35 aktif Crohn hastasına uygulanmıştır. Çalışmada klinik durum skorları ve rektal biyopsiler başlangıçta ile 3. ve 6. aylarda değerlendirilmiş; immün belirteçlerin transkripsiyon seviyeleri ve mukozal bakteri 16S rRNA gen kopya sayıları ölçülmüştür. Sinbiyotik grubunda Crohn hastalığı aktivite indeksleri ve histolojik skorlar anlamlı şekilde iyileşmiş, TNF- α ekspresyonunda 3. ayda belirgin azalma gözlenmiş ve mukozal *Bifidobakteriler* çoğalmıştır (Steed vd., 2010).

5. Sonuç

Bağırsak mikrobiyotası; sinir, bağışıklık ve endokrin sistemleri ile konakçı sinyalleri ve mikrobiyal metabolitler aracılığıyla vücuttaki organlarla sürekli etkileşim halindedir. Bu karmaşık iletişim ağı, beyin, karaciğer, böbrek ve kemik gibi organların sağlığını etkileyerek insan fizyolojisinde önemli bir rol oynar. Mikrobiyota ile metabolik sağlık arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması, kişiselleştirilmiş tedavi ve hastalık önleme yaklaşımlarında yeni olanaklar sunmaktadır. Probiyotik, prebiyotik ve sinbiyotiklerin mikrobiyotayı dengeleyici etkileri; obezite, inflamatuvar bağırsak hastalıkları ve mental sağlık gibi alanlarda potansiyel yararlar sağlamaktadır. Sağlık bilincinin artmasıyla bu takviyelere olan ilgi büyümekte ve yeni türleri keşfedilmektedir. Ancak bu bileşenlerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini netleştirmek için kapsamlı ve iyi tasarlanmış klinik çalışmalara ihtiyaç vardır. Mevcut bulgular, bu takviyelerin sınırlı ama anlamlı faydalar sağlayabileceğini ve gelecekte kişiselleştirilmiş tıp ve terapötik stratejiler açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Kaynakça

- Bedu-Ferrari, C., Biscarrat, P., Langella, P., & Cherbuy, C. (2022). Prebiotics and the Human Gut Microbiota: From Breakdown Mechanisms to the Impact on Metabolic Health. *Nutrients*, 14(10), 2096.
- Cani, P. D., & Knauf, C. (2016). How gut microbes talk to organs: The role of endocrine and nervous routes. *Molecular Metabolism*, 5(9), 743–752.
- Çelik, M. N., & Ünlü Söğüt, M. (2019). Probiotics improve chemerin levels and metabolic syndrome parameters in obese rats. *Balkan Medical Journal*, 36(5), 270–275.
- Cheng, F. S., Pan, D., Chang, B., Jiang, M., & Sang, L. X. (2020). Probiotic mixture VSL#3: An overview of basic and clinical studies in chronic diseases. *World Journal of Clinical Cases*, 8(8), 1361–1384.
- Collado, M. C., Gueimonde, M., Sanz, Y., & Salminen, S. (2006). Adhesion Properties and Competitive Pathogen Exclusion Ability of Bifidobacteria with Acquired Acid Resistance. *Journal of Food Protection*, 69(7), 1675–1679.
- Dai, L., Huang, T., Jiang, K., Zhou, X., & Xu, Y. (2021). A novel recyclable furoic acid-assisted pretreatment for sugarcane bagasse biorefinery in co-production of xylooligosaccharides and glucose. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 73.
- Dargahi, N., Johnson, J., Donkor, O., Vasiljevic, T., & Apostolopoulos, V. (2019). Immunomodulatory effects of probiotics: Can they be used to treat allergies and autoimmune diseases? *Maturitas*, 119, 25–38.
- Fei, Y., Chen, Z., Han, S., Zhang, S., Zhang, T., Lu, Y., Berglund, B., Xiao, H., Li, L., & Yao, M. (2023). Role of prebiotics in enhancing the function of next-generation probiotics in gut microbiota. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(8), 1037–1054.
- Gowd, V., Karim, N., Shishir, M. R. I., Xie, L., & Chen, W. (2019). Dietary polyphenols to combat the metabolic diseases via altering gut microbiota. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 81–93.
- Haghighat, N., Mohammadshahi, M., Shayanpour, S., Haghighizadeh, M., Rahmdel, S., & Rajaei, M. (2021). The Effect of Synbiotic and Probiotic Supplementation on Mental Health Parameters in Patients Undergoing Hemodialysis: A Double-blind, Randomized, Placebo-controlled Trial. *Indian Journal of Nephrology*, 31(2), 149–157.
- Han, X., Ma, Y., Ding, S., Fang, J., & Liu, G. (2023). Regulation of dietary fiber on intestinal microorganisms and its effects on animal health. *Animal Nutrition*, 14, 356–369.
- Hassan, N. E., El-Masry, S. A., El Shebini, S. M., Ahmed, N. H., Mehanna, N. S., Abdel Wahed, M. M., Amine, D., Hashish, A., Selim, M., Afify, M. A. S., & Alian, K. (2024). Effect of weight loss program using prebiotics

- and probiotics on body composition, physique, and metabolic products: longitudinal intervention study. *Scientific Reports*, 14(1), 2936.
- Khan, I., Ullah, N., Zha, L., Bai, Y., Khan, A., Zhao, T., Che, T., & Zhang, C. (2019). Alteration of gut microbiota in inflammatory bowel disease (IBD): Cause or consequence? IBD treatment targeting the gut microbiome. *Pathogens*, 8(3), 126.
- Khanna, S., Walia, S., Kondepudi, K. K., & Shukla, G. (2020). Administration of indigenous probiotics modulate high-fat diet-induced metabolic syndrome in Sprague Dawley rats. *Antonie van Leeuwenhoek*, 113(9), 1345–1359.
- Kim, Y. T., & Mills, D. A. (2024). Exploring the gut microbiome: probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics as key players in human health and disease improvement. *Food Science and Biotechnology*, 33(9), 2065–2080.
- Kumari, A., K. G. R., Sudhakaran, V. A., Warriar, A. S., & Singh, N. K. (2024). Unveiling the Health Benefits of Prebiotics: A Comprehensive Review. *Indian Journal of Microbiology*, 64(2), 376–388.
- Lee, Y. J., Yu, W. K., & Heo, T. R. (2003). Identification and screening for antimicrobial activity against *Clostridium difficile* of *Bifidobacterium* and *Lactobacillus* species isolated from healthy infant faeces. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 21(4), 340–346.
- Li, H. Y., Zhou, D. D., Gan, R. Y., Huang, S. Y., Zhao, C. N., Shang, A., Xu, X. Y., & Li, H. Bin. (2021). Effects and mechanisms of probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics on metabolic diseases targeting gut microbiota: A narrative review. *Nutrients*, 13(9), 3211.
- Liu, X., Du, P., Xu, J., Wang, W., & Zhang, C. (2024). Therapeutic Effects of Intermittent Fasting Combined with SLBZS and Prebiotics on STZ-HFD-Induced Type 2 Diabetic Mice. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity*, 17, 4013–4030.
- Makras, L., Triantafyllou, V., Fayol-Messaoudi, D., Adrian, T., Zoumpopoulou, G., Tsakalidou, E., Servin, A., & De Vuyst, L. (2006). Kinetic analysis of the antibacterial activity of probiotic lactobacilli towards *Salmonella enterica* serovar Typhimurium reveals a role for lactic acid and other inhibitory compounds. *Research in Microbiology*, 157(3), 241–247.
- Marnpae, M., Balmori, V., Kamonsuwan, K., Nungarlee, U., Charoensiddhi, S., Thilavech, T., Suantawee, T., Sivapornnukul, P., Chanchaem, P., Payungporn, S., Dahlan, W., Hamid, N., Nhujak, T., Adisakwattana, S., & Adisakwattana, S. (2024). Modulation of the gut microbiota and short-chain fatty acid production by gac fruit juice and its fermentation in in vitro colonic fermentation. *Food & Function*, 15(7), 3640–3652.

- Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E., & Rotondo, J. C. (2023). Probiotics Mechanism of Action on Immune Cells and Beneficial Effects on Human Health. *Cells*, 12(1), 184.
- McFleder, R. L., Makhotkina, A., Groh, J., Keber, U., Imdahl, F., Peña Mosca, J., Peteranderl, A., Wu, J., Tabuchi, S., Hoffmann, J., Karl, A. K., Pagenstecher, A., Vogel, J., Beilhack, A., Koprach, J. B., Brochie, J. M., Saliba, A. E., Volkmann, J., & Ip, C. W. (2023). Brain-to-gut trafficking of alpha-synuclein by CD11c+ cells in a mouse model of Parkinson's disease. *Nature Communications*, 14(1), 1469.
- Miller, L. E., Lehtoranta, L., & Lehtinen, M. J. (2019). Short-term probiotic supplementation enhances cellular immune function in healthy elderly: systematic review and meta-analysis of controlled studies. *Nutrition Research*, 64, 1–8.
- Oelschlaeger, T. A. (2010). Mechanisms of probiotic actions - A review. *International Journal of Medical Microbiology*, 300(1), 57–62.
- Olvera-Rosales, L. B., Cruz-Guerrero, A. E., Ramírez-Moreno, E., Quintero-Lira, A., Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., Castañeda-Ovando, A., Añorve-Morga, J., Calderón-Ramos, Z. G., Arias-Rico, J., & González-Olivares, L. G. (2021). Impact of the gut microbiota balance on the health–disease relationship: The importance of consuming probiotics and prebiotics. *Foods*, 10(6), 1261.
- Oniszcuk, A., Oniszcuk, T., Gancarz, M., Szymańska, J., & Hamaguchi, M. (2021). Role of Gut Microbiota, Probiotics and Prebiotics in the Cardiovascular Diseases. *Molecules*, 26(4), 1172.
- Peredo-Lovillo, A., Romero-Luna, H. E., & Jiménez-Fernández, M. (2020). Health promoting microbial metabolites produced by gut microbiota after prebiotics metabolism. *Food Research International*, 136, 109473.
- Roupar, D., González, A., Martins, J. T., Gonçalves, D. A., Teixeira, J. A., Botelho, C., & Nobre, C. (2023). Modulation of Designed Gut Bacterial Communities by Prebiotics and the Impact of Their Metabolites on Intestinal Cells. *Foods*, 12(23), 4329.
- Roy, S., & Dhaneshwar, S. (2023). Role of prebiotics, probiotics, and synbiotics in management of inflammatory bowel disease: Current perspectives. *World Journal of Gastroenterology*, 29(14), 2078–2100.
- Rudzki, L., Ostrowska, L., Pawlak, D., Małus, A., Pawlak, K., Waszkiewicz, N., & Szulc, A. (2019). Probiotic Lactobacillus Plantarum 299v decreases kynurenine concentration and improves cognitive functions in patients with major depression: A double-blind, randomized, placebo controlled study. *Psychoneuroendocrinology*, 100, 213–222.
- Wang, X., Zhang, P., & Zhang, X. (2021). Probiotics Regulate Gut Microbiota: An Effective Method to Improve Immunity. *Molecules*, 26(19), 6076.

- Wu, W., Kong, Q., Tian, P., Zhai, Q., Wang, G., Liu, X., Zhao, J., Zhang, H., Lee, Y. K., & Chen, W. (2020). Targeting Gut Microbiota Dysbiosis: Potential Intervention Strategies for Neurological Disorders. *Engineering*, 6(4), 415–423.
- Xie, Z., He, W., Gobbi, A., Bertram, H. C., & Nielsen, D. S. (2024). The effect of in vitro simulated colonic pH gradients on microbial activity and metabolite production using common prebiotics as substrates. *BMC Microbiology*, 24(1), 121.
- Yoo, S., Jung, S. C., Kwak, K., & Kim, J. S. (2024). The Role of Prebiotics in Modulating Gut Microbiota: Implications for Human Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9), 4854.
- You, C., Sun, Z., Gao, P., Hu, J., Wu, Q., & Ding, C. (2022). The promotion mechanism of prebiotics for probiotics: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1000517.
- Zhang, C. X., Wang, H. Y., & Chen, T. X. (2019). Interactions between Intestinal Microflora/Probiotics and the Immune System. *BioMed Research International*, 2019, 6764919.

Postbiyotiklerin Fonksiyonel Gıdalardaki Potansiyeli ve Mekanizmaları

Seda Nur Erciyes¹

Sena Davran Bulut²

Özet

Gıda, insan sağlığının korunmasında temel bir unsurdur ve içerdği çeşitli biyoaktif bileşenler sayesinde fizyolojik işlevleri destekler. Son yıllarda mikrobiyota kaynaklı metabolitlerin sağlık üzerindeki etkilerine ilişkin artan bulgular, postbiyotik kavramının ortaya çıkmasına yol açmıştır. Postbiyotikler, canlı mikroorganizmaların kendilerinden ziyade metabolik ürünlerinin oluşturduğu biyoaktif bileşenlerdir ve probiyotiklerin güvenlik, stabilite ve canlılık sınırlamalarını ortadan kaldıran yeni nesil fonksiyonel gıda bileşenleri olarak öne çıkmaktadır.

Postbiyotiklerin avantajları arasında yüksek biyoyararlanım, uzun raf ömrü, ısı ve pH dayanıklılığı, güvenli kullanım ve kolay formülasyon entegrasyonu yer alır. Bu özellikleriyle hem gıda teknolojisinde hem de sağlık destekleyici ürünlerde geniş uygulama alanına sahiptirler. Başlıca postbiyotik bileşenler; hücresiz süpernatantlar, kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar), ekzopolisakkaritler (EPS), bakteriyosinler, peptidoglikanlar ve teikoik asitlerdir. Bu bileşenler; antimikrobiyal, antiinflamatuvar, antikanser ve antiviral etkiler göstererek bağışıklık sisteminin düzenlenmesi, bağırsak bariyerinin güçlendirilmesi, patojenlerin baskılanması ve inflamasyonun azaltılmasında rol oynamaktadır. Özellikle LAB (laktik asit bakterileri) kökenli metabolitlerin, gıda ürünlerinde hem doğal koruyucu ajan hem de fonksiyonel bileşen olarak kullanılabildiği bildirilmektedir. Bu bölümde, postbiyotiklerin gıdalarda kullanımı ele alınmıştır.

- 1 Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, sedanurerciyes@gmail.com, 0009-0002-9162-7951
- 2 Arş. Gör., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, sdavran@bartin.edu.tr, 0000-0002-8988-3801

1. Giriş

Gıda, insan sağlığının korunması ve yaşamın sürdürülebilirliği açısından temel bir gerekliliktir; içerdiği lipitler, karbonhidratlar, proteinler, fitokimyasallar, antioksidanlar, vitaminler, probiyotik ve prebiyotikler sağlık üzerinde çeşitli destekleyici roller üstlenmektedir. Son yıllarda fonksiyonel gıda endüstrisinde yaşanan yenilikler ise bu bileşenlerden özellikle prebiyotikler, fitokimyasallar, doğal antioksidanlar ve biyoaktif peptitlerin üretimini önemli ölçüde artırmıştır (Cizeikiene ve Jagelaviciute, 2021; Gurunathan vd., 2024). Mikrobiyota kaynaklı metabolitlerin yalnızca bağırsak sağlığında değil, fonksiyonel gıdaların geliştirilmesinde de önemli rol oynadığı bildirilmektedir (Mishra vd., 2024).

Mikrobiyota kaynaklı bu metabolitlerin konak fizyolojisi üzerindeki etkileri, son yıllarda “postbiyotik” kavramını gündeme getirmiştir. Canlı mikroorganizmaların kendilerinden ziyade, onların metabolik ürünlerinin sağlık üzerindeki olumlu etkilerini ifade eden postbiyotikler; probiyotiklerin güvenlik ve stabilite sınırlamalarını aşma potansiyeliyle dikkat çekerken, bakteriyel canlılığın sağlık yararları için temel bir gereklilik olmadığını ve fonksiyonel gıdalar alanında yeni fırsatlar sunduğunu ortaya koymuş, bu doğrultuda *paraprobioyotik* ve *postbiyotik* gibi yeni kavramların literatürde yer bulmasına zemin hazırlamıştır (Aguilar-Toalá vd., 2018).

Fonksiyonel gıdaların geliştirilmesi bağlamında, postbiyotikler yeni nesil biyoaktif bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Postbiyotiklerin klasik probiyotik ve prebiyotik içeriklere kıyasla tekil bileşim, yüksek fizyolojik aktivite, uzun raf ömrü ve kolay absorpsiyon gibi teknoloji-uygulama açısından avantajları olduğu vurgulanmaktadır (Wei vd., 2024). Bu avantajlar, fonksiyonel gıda formülasyonlarında hem biyoyararlanım hem de stabilite yönünden önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, postbiyotiklerin bağırsak bariyerinin iyileştirilmesi, patojenik mikroorganizmaların bastırılması ve immün yanıtın düzenlenmesi gibi mekanizmalarla sağlık üzerindeki katkılarını göstermektedir. Fonksiyonel gıda endüstrisi açısından da gıdaların mikrobiyal bozulmaya karşı direncini artırma ve koruyucu katkı maddesi yerine postbiyotiklerin kullanılabilmesi gibi yenilikçi yaklaşımlar gündeme gelmiştir (Isaac-Bamgboye vd., 2024; Wei vd., 2024).

Postbiyotikler, canlı mikroorganizmalar içermemeleri nedeniyle, probiyotiklerle ilişkili potansiyel risklerin büyük ölçüde azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Binda vd., 2020; Salminen vd., 2021). Canlı probiyotiklerin kullanımında dikkat çeken başlıca bir sorun, bazı suşlarda antibiyotige direnç genlerinin bulunmasıdır. Bu durum, yatay gen transferi yoluyla direnç genlerinin patojenik mikroorganizmalara aktarılabilme

olasılığını artırmaktadır (Thorakkattu vd., 2022; Vinderola vd., 2022). Bu bağlamda, probiyotiklerin stabilite ve güvenlik sınırlamaları, takviye ürünlerinden beklenen sağlık faydalarının her zaman elde edilememesine neden olabilmektedir. Canlı hücreler yerine, probiyotiklerin metabolitlerini ve hücresel bileşenlerini içerdiği için hem güvenlik hem de depolama ve uygulama açısından daha avantajlıdır. Özellikle bağışıklık modülasyonu, inflamasyon kontrolü, antioksidan aktivite ve bağırsak bariyer fonksiyonunu destekleme gibi biyolojik etkiler gösterdikleri bildirilmiştir. Bu nedenle, postbiyotik araştırmalarının önemli bir kısmı, konak sağlığını iyileştiren yenilikçi fonksiyonel gıdaların ve önleyici terapötik ürünlerin geliştirilmesine odaklanmakta, aynı zamanda etki mekanizmalarının ayrıntılı olarak tanımlanmasını hedeflemektedir. Buna ek olarak, postbiyotiklerin fonksiyonel gıda formülasyonlarında kullanımı, probiyotiklerin karşılaştığı sıcaklık, pH ve depolama koşullarına bağlı stabilite sorunlarını büyük ölçüde aşmaktadır. Bu durum, ürünlerin raf ömrünü ve biyoyararlanımını iyileştirerek, sağlık destekleyici etkilerin daha güvenilir bir şekilde sunulmasına olanak tanımaktadır. Böylece, postbiyotikler hem güvenlik hem de fonksiyonellik açısından probiyotiklere kıyasla daha kontrollü ve sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Binda vd., 2020; Shahali vd., 2023).

Tüm bu veriler ışığında, postbiyotiklerin yalnızca probiyotiklerin bir alternatifi değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda biliminde yeni bir dönemin öncüsü olduğu görülmektedir. Özellikle içeriklerindeki kısa zincirli yağ asitleri (SCFA'lar), ekzopolisakkaritler (EPS'ler), peptidoglikanlar ve bakteriyosinler gibi bileşenler; bağırsak bariyer fonksiyonunun korunması, inflamasyonun azaltılması ve immün yanıtın dengelenmesi gibi temel fizyolojik süreçlerde rol oynamaktadır (Aguilar-Toalá vd., 2018; Żółkiewicz vd., 2020). Bu etkiler, postbiyotiklerin yalnızca mikrobiyal aktiviteye bağlı olmayan, doğrudan konak hücrelerle etkileşime girebilen biyolojik ajanlar olduğunu göstermektedir.

Fonksiyonel gıda uygulamaları açısından değerlendirildiğinde, postbiyotiklerin stabilite, güvenlik ve formülasyon esnekliği gibi avantajları hem endüstriyel üretim süreçlerinde hem de ürün geliştirme stratejilerinde önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca, canlı mikroorganizma içermemeleri nedeniyle probiyotiklerin karşılaşılabileceği ısı, pH ve depolama koşullarına bağlı bozulma riskleri ortadan kalkmakta; böylece ürünlerin raf ömrü, biyoyararlanımı ve güvenilirliği artırılmaktadır (Isaac-Bamgboye vd., 2024; Wei vd., 2024; Zhong vd., 2024).

2. Postbiyotik Bileşenlerin Sınıflandırılması

Postbiyotiklerin sınıflandırılması; mikroorganizma türü, yapısal özellikleri ve fizyolojik işlevlerine bağlı olarak değişmektedir. Probiyotik bakteriler tarafından hem hücre içi hem de hücre dışı ortamlarda sentezlenen çeşitli postbiyotik bileşenler tanımlanmıştır. Bunlar arasında peptidoglikan kökenli muropeptitler, ekzopolisakkaritler (EPS), teikoik asitler, yüzey yapılarıyla ilişkili fimbriae, pili ve flagella türevli moleküller ile salgılanan proteinler, bakteriyosinler, hücresiz süpernatantlar, organik asitler ve nörotransmitterler yer almaktadır (Binda vd., 2020). Kaynak ve biyolojik işlevlerine göre postbiyotikler; inaktif veya ölü probiyotik hücreler, peptidoglikanlar, teikoik asitler, ekzopolisakkaritler, kısa zincirli yağ asitleri, bakteriyosinler, enzimler, vitaminler ve hücresiz süpernatantlar gibi çeşitli alt gruplarda sınıflandırılmaktadır (Nataraj, 2020).

2.1. Hücresiz Süpernatant (CFS)

Hücresiz süpernatantlar (CFS'ler), genellikle laktik asit bakterileri (LAB) ve mayalar tarafından sentezlenen, düşük veya yüksek moleküler ağırlıklı biyoaktif metabolitlerin kompleks bir karışımını temsil etmektedir. Bu bileşikler; organik asitler, diasetil, karbondioksit, bakteriyosin benzeri maddeler ve çeşitli sekonder metabolitleri içermekte olup, fizyolojik homeostazın korunmasında rol oynayabilir (Kapustian vd., 2018; Singh vd., 2017). CFS'nin kimyasal bileşimi, kullanılan mikrobiyal tür ve kültür ortamına bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Fermentasyon süreci sonucunda elde edilen CFS'ler, antibakteriyel, antibiyofilm, antiinflamatuvar, antioksidan ve antikanser aktiviteler sergileyerek geleneksel antimikrobiyal ajanlara alternatif potansiyel taşımaktadır (Lee vd., 2022). Santrifüjleme ile mikrobiyal hücrelerden ayrıştırılan bu metabolitler, fenolik, flavonoid, antioksidan, antiinflamatuvar ve antikanser bileşikler bakımından zengindir. IL-10 gibi antiinflamatuvar sitokinlerin ekspresyonunu artırırken, TNF- α ve IL-1 β gibi proinflamatuvar sitokinlerin baskılanmasına aracılık edebilir. LAB kaynaklı CFS'lerin antimikrobiyal aktivitesi esas olarak içerdiği laktik ve asetik asitler ile proteinli bileşikler ve yağ asitlerinden kaynaklanmaktadır (Mani-López, 2022). *Lactobacillus fermentum*'dan elde edilen hücresiz kültür filtratlarının kolorektal kanser (KRK) hücrelerinde antiproliferatif etkiler gösterdiği bildirilmiştir (Lee ve Kim, 2020). Benzer şekilde, *Lactobacillus reuteri* kaynaklı süpernatantın karbonhidrat ve yağ asidi metabolitleri aracılığıyla diş çürükleri ve periodontal hastalıkların önlenmesinde kullanıma potansiyeli olduğu belirtilmiştir. Farklı mikroorganizmalardan elde edilen hücresiz süpernatantların antioksidan, antibakteriyel, antitümör ve metabolik hastalıkları hafifletici etkiler gösterebildiği çeşitli

çalışmalarla ortaya konmuştur (Wei vd., 2024). Ayrıca probiyotik kökenli süpernatantların nitrik oksit, TNF- α , malondialdehit ve miyeloperoksidaz düzeylerini azaltarak; NF- κ B p65, iNOS ve COX-2 ekspresyonunu baskılamak suretiyle kolit semptomlarını hafifletebildiği bildirilmiştir (Samer vd., 2022). *Lactobacillus gasseri* GM18 süpernatantı, *Cronobacter sakazakii* ve *Listeria monocytogenes* biyofilm oluşumunu bozarak enfeksiyon etkinliğini azaltırken, *L. paracasei* SD1 ve *L. rhamnosus* SD11 suşlarından elde edilen süpernatantların Caco-2 hücrelerinde proinflamatuvar faktör ekspresyonunu baskılayarak kolorektal kansere karşı koruyucu etki gösterdiği rapor edilmiştir (Pahumunto ve Teanpaisan, 2023; Singh vd., 2020).

2.2. Kısa Zincirli Yağ Asitleri (SCFA'lar)

Postbiyotikler arasında en kapsamlı şekilde araştırılan bileşikler olan SCFA'lar, çeşitli fizyolojik işlevler gösterir. Hücreler için önemli bir enerji kaynağı olarak görev yaparlar ve çoğu, epitel hücreleri tarafından emilerek enerji üretiminde kullanılır (Silva, 2020). SCFA'lar, esas olarak formik, asetik, propiyonik, bütirik ve valerik asitleri içeren ve altıdan az karbon atomu taşıyan bir grup yağ asidi olarak tanımlanır. Bu bileşikler, konakçı enzimlerin sindiremediği diyet liflerinin kolonda **anaerobik mikrobiyal fermentasyonu** sonucu oluşan uçucu yağ asidi metabolitleridir (Fattahi vd., 2020). Aynı zamanda SCFA'lar, bağırsak lümeninde pH düşürerek *Salmonella spp.*, *Clostridium perfringens* ve *Escherichia coli* gibi zararlı mikroorganizmaların büyümesini inhibe eder (Aguilar-Toalá vd., 2018).

2.3. Ekzopolisakkaritler (EPS)

Laktik asit bakterileri (LAB), birçok bakteriyel türde olduğu gibi çeşitli polisakkarit veya glikan türlerini sentezleme kapasitesine sahiptir. Bu mikroorganizmalar tarafından üretilen ekzopolisakkaritler (EPS), bakteriyel hücre yüzeyinde yer alan veya ortama salınan yüksek molekül ağırlıklı karbonhidrat polimerleridir. EPS'ler, kapsül polisakkaritler ve balçık (slime) polisakkaritleri olmak üzere iki temel formda üretilebilir (Lee vd., 2016). Kapsül formundaki EPS'ler genellikle hücre yüzeyine sıkıca bağlı olup bakteriyi çevresel stres faktörlerinden korurken; balçık formundaki EPS'ler ortama serbestçe salınır ve viskozite ile jel yapısına katkı sağlar. Monosakkarit bileşimlerine göre EPS'ler iki ana sınıfa ayrılır: homopolisakkaritler (HoPS) ve heteropolisakkaritler (HePS). HoPS, yalnızca tek bir tür monosakkarit biriminden oluşur (çoğunlukla D-glukoz, D-fruktoz veya sakkaroz türevleri) ve bu birimler α - veya β -glikozidik bağlar aracılığıyla birbirine bağlanır (Oerlemans vd., 2021). Buna karşılık, HePS yapısında iki veya daha fazla farklı monosakkarit türü bulunur; bunlar genellikle

D-glukoz, D-galaktoz ve L-ramnozdaki oluşur. Bu yapısal çeşitlilik, HePS'lerin HoPS'lere göre daha kompleks bir kimyasal yapıya, değişken dallanma derecelerine ve farklı fonksiyonel özelliklere sahip olmasına neden olmaktadır. Ayrıca HePS'ler genellikle daha büyük molekül ağırlıklarına ve daha karmaşık zincir konformasyonlarına sahiptir.

EPS sentezinin miktarı ve yapısal özellikleri; mikroorganizma türü, kültür ortamının bileşimi, karbon kaynakları, başlangıç pH değeri, sıcaklık, inkübasyon süresi ve havalandırma koşulları gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Daba vd., 2021). Son on yılda, LAB kökenli EPS'lerin gıda endüstrisinde fonksiyonel bileşenler olarak kullanımı büyük ilgi görmüştür. Bu biyopolimerler; tekstürel özellikleri iyileştirme, viskoziteyi artırma, su tutma kapasitesini yükseltme ve sinerezis azaltma gibi avantajlar sunmaktadır. Örneğin, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* DGCC291 tarafından üretilen HePS, yoğurt formülasyonlarında viskoziteyi önemli ölçüde artırırken sinerezis oranını azaltmaktadır (Gentès vd., 2016). Buna karşın, *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* LBB.B332 tarafından sentezlenen HoPS tipi EPS yalnızca viskozite artışı sağlamaktadır (Xu vd., 2019). Bu durum, HePS'in HoPS'e kıyasla daha fonksiyonel ve gıda matrisine etki eden yapısal çeşitliliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, LAB kaynaklı EPS'lerin antibakteriyel, antioksidan ve film oluşturu özellikleri de dikkat çekmektedir. Bu biyopolimerler, yenilebilir film ve kaplamaların geliştirilmesinde doğal biyopolimer alternatifleri olarak kullanılmaktadır (Frederick vd., 2011). Ayrıca, EPS'lerin probiyotik mikroorganizmaların mide ve bağırsak transitinde korunmasını sağladığı, bu sayede kapsülleme materyali olarak önemli potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir (Piermaria vd., 2015). Bu bağlamda LAB kaynaklı EPS'ler, yalnızca gıda tekstürünü iyileştiren katkı maddeleri değil; aynı zamanda probiyotiklerin stabilitesini artıran, biyolojik işlevselliği destekleyen ve postbiyotik yaklaşımlarla ilişkilendirilebilen biyoaktif bileşenler olarak değerlendirilmektedir (Abdalla vd., 2021; Angelin ve Kavitha, 2020).

2.4. Bakteriyosinler

Laktik asit bakterileri (LAB), bakteri ve arkebakteriler gibi mikroorganizmalar, bakteriyosin olarak adlandırılan küçük, ribozomal olarak sentezlenen antimikrobiyal peptitler üretmektedir. Bu bileşikler, diğer bakterilerin çoğalmasını engelleyebilme veya yok edebilme özellikleriyle öne çıkmaktadır. Soltani ve ark. (Soltani vd., 2021) bakteriyosinlerin ilaca dirençli patojenlere karşı yeni nesil antimikrobiyal ajanlar olarak terapötik önem taşıdığını bildirmiştir. Nisin, subtilisin, enterosin, plantarisin ve laktisin gibi bakteriyosinler özellikle gıda koruma alanında dikkat çekmektedir (Perez

vd., 2014). Nisin, EFSA, FDA ve Health Canada tarafından onaylanmış ilk bakteriyosin olup günümüzde 80'den fazla ülkede gıda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Etkilerini hücre zarında por oluşturarak, hücre duvar sentezini ve enzim aktivitelerini inhibe ederek göstermektedir. *L. paracasei* ve *L. taiwanensis*'in bakteriyosinogenik suşlarının *E. coli*, *Salmonella gallinarum* ve enteropatojenik *E. coli*'ye karşı antibakteriyel aktivite gösterdiği bildirilmiştir (Belguesmia vd., 2020; Kim vd., 2020). Bakteriyosinler, antimikrobiyal özellikleri nedeniyle tıp, gıda, kanser tedavisi, kozmetik ve veterinerlik alanlarında geniş uygulama potansiyeline sahiptir.

2.5. Enzimler

Enzimler, biyolojik reaksiyonları hızlandıran proteinlerdir ve aktiviteleri veya işlevlerine göre altı temel gruba ayrılır: oksidoredüktazlar, transferazlar, hidrolazlar, liyazlar, izomerazlar ve ligazlar (Singhania vd., 2017). Başta *Bacillus subtilis* ve *Bacillus licheniformis* olmak üzere sınırlı sayıda bakteri türü ve özellikle *Aspergillus niger* ile *Aspergillus oryzae* gibi bazı mantar türleri, çeşitli fizyolojik, metabolik ve düzenleyici süreçlerde birincil enzim kaynakları olarak kullanılır. Ayrıca, güçlü *in vitro* antioksidan özellikler gösteren iki *Lactobacillus fermentum* suşunda yüksek miktarda glutatyon peroksidaz aktivitesi tespit edilmiştir. *Bacillus* türleri, sıcaklık, pH, organik çözücüler, oksitleyici ajanlar ve deterjanlar gibi zorlu koşullara karşı oldukça dayanıklı olup yüksek verimle proteolitik enzim üretebilir. Öte yandan, genetiği değiştirilmiş bir *Lactococcus lactis* suşundan elde edilen katalazın, kimyasal olarak indüklenen kolon kanserine sahip fareleri koruyabildiği gösterilmiştir (Contesini vd., 2018; Gurunathan vd., 2024).

3. Postbiyotiklerin Gıda Endüstrisindeki Uygulamaları

Son yıllarda probiyotikler, prebiyotikler ve postbiyotikler gibi fonksiyonel bileşenlere sahip gıdalar; araştırmacılar, üreticiler ve tüketiciler arasında artan bir ilgi görmektedir. Konakçı sağlığını destekleyen, hastalıkların önlenmesine katkı sağlayan ve etki mekanizmaları bilimsel olarak açıklanabilen yeni nesil fonksiyonel gıdaların geliştirilmesi, postbiyotik araştırmalarının temel odak noktalarından biri haline gelmiştir (Gurunathan vd., 2024). Günümüzde süt ve süt dışı ürünler gibi çeşitli matrislerde probiyotik ve postbiyotik içeren ürünler piyasada yer almakta; bu sayede laktoz intoleransı, süt proteinine alerjisi olan bireyler veya vejetaryenler gibi farklı beslenme tercihine sahip tüketicilerin gereksinimleri karşılanabilmektedir (Thorakkattu vd., 2022). Geniş sıcaklık ve pH aralıklarında stabil olmaları, üretim sürecinde termal işlemlere dayanıklılık kazandırmakta ve gıda formülasyonlarına doğrudan eklenmelerine olanak sağlamaktadır. Bu özellik, üreticiler

açısından teknik kolaylık ve ekonomik avantaj sunar. Ayrıca, postbiyotikler farmasötik preparatlar veya fonksiyonel gıdalar gibi farklı taşıyıcı sistemlerde de kullanılabilir; zira canlılık, bu bileşiklerin etkinliği için belirleyici bir unsur değildir (Gurunathan vd., 2024). Hücre yüzey proteinleri, enzimler, peptitler, nöropeptitler, metabolitler ve laktik asit gibi organik asitleri içeren bakteriyel lizatlardan elde edilen fraksiyonlar, postbiyotiklerin temel örnekleridir. Fermantasyon süreçleri, gıda endüstrisinde en yaygın postbiyotik üretim yöntemidir. Kefir, kimchi, yoğurt ve fermente sebzeler gibi birçok geleneksel gıda ürünü doğal olarak postbiyotik bileşenler içermektedir. *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Saccharomyces*, *Bacillus*, *Streptococcus* ve *Faecalibacterium* cinslerine ait mikroorganizmalar; hücre duvarı bileşenleri, enzimatik fraksiyonlar ve sitoplazmik özler şeklinde yüksek biyolojik aktiviteye sahip postbiyotikler üretebilmektedir (Arshad vd., 2018; Jensen vd., 2010; Sokol vd., 2008; Tejada-Simon vd., 1999). *Lactocaseibacillus rhamnosus* tarafından üretilen EPS'ler, gıdaların fizikokimyasal özelliklerini ve duyu kalitesini iyileştirir (Aguilar-Toalá vd., 2018). *L. plantarum* YML007'den elde edilen süpernatanın postbiyotik bileşimi, soya fasulyesinin raf ömrünü iki aya kadar uzatmıştır (Ahmad Rather vd., 2013). Benzer şekilde, *Bifidobacterium pseudocatenulatum* ve *B. longum* spp. *infantis*'ten elde edilen fitaz enzimleri, tahıllardaki fitat miktarını azaltarak mineral biyoyararlanımını artırmıştır (Tomasik ve Tomasik, 2020). LAB fermentasyonu, tahılların besin değerini artırmak açısından da önemlidir. Bu süreçte B1, B2, B3, B9, B11 ve B12 vitaminlerinin üretimi artarken, lizin, protein, çözünür lif ve minerallerin biyoyararlanımı da iyileşmektedir. Ayrıca LAB fermentasyonu, antioksidan peptitler, γ -aminobütirik asit ve anjiyotensin I dönüştürücü enzim inhibitör peptitlerin oluşumunu teşvik eder (Ayyash vd., 2019). Postbiyotikler, mikrobiyal bozulmayı önleyerek gıdaların raf ömrünü uzatır. Bu etkilerini, hücre zarında gözenek oluşumu, hücre duvar proteinlerinin modifikasyonu ve sitoplazmik pH düşürme gibi mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştirirler (Rad vd., 2021). Et ve balık ürünlerinin doğrudan postbiyotik kaplamalarla veya püskürtme yöntemiyle korunması hem mikrobiyal kontaminasyonu azaltmakta hem de duyu özellikleri korumaktadır. Örneğin *Pediococcus acidilactici*, *Latilactobacillus sakei* ve *Staphylococcus xylosum*'tan elde edilen fenolik ve flavonoid içeren postbiyotikler, tavuk etinde *Salmonella typhimurium*'u önemli ölçüde azaltmıştır. Benzer şekilde, *Saccharomyces cerevisiae* fermentasyon ürünlerinin tüketimi, kümes hayvanı ürünlerinde *Salmonella enterica* kontaminasyonunu sınırlayabilmektedir (Chaney vd., 2022; İncili vd., 2022). Postbiyotik bazlı koruyucuların, vakumla paketlenmiş pişmiş sosislerde geleneksel kimyasal koruyucular kadar etkili olduğu bildirilmiştir (de Lima vd., 2022). Bu nedenle postbiyotikler; süt ürünleri, meyve, sebze ve et

ürünlerinin güvenli üretimi için umut vadeden doğal biyokontrol ajanlarıdır. Bazı bakteriyosin ve LAB türevleri, peynirde gaz oluşumuna bağlı kalite kusurlarını kontrol etmede önemli rol oynar. Ek olarak, postbiyotiklerin gıda endüstrisinde doğal dezenfektan olarak kullanılabileceği de bildirilmektedir (Moradi vd., 2020).

4. Postbiyotiklerin Antiviral, Antibakteriyel, Antikanser Ve Antiinflatuvar Mekanizmaları

4.1. Antiviral Etkileri

Viral hastalıklar, dünya genelinde önemli bir halk sağlığı tehdidi oluşturmaktadır. Bu durum, enfeksiyonların önlenmesinde antiviral ilaçların ve aşılarda önemini ortaya koymaktadır. Postbiyotiklerin antiviral etkileri, esas olarak virüslerin konak hücrelere tutunmasını engelleyerek enfeksiyon sürecinin başlamasını geciktirmesiyle ortaya çıkar. Postbiyotikler, virüslerin hücre yüzeyindeki reseptörlere bağlanmasını önleyerek hücre içine girişlerini engeller ve aynı zamanda konağın bağışıklık sistemini güçlendirir (Baud vd., 2020; Sundararaman vd., 2020).

Bağışıklık sistemi, virüsleri tanıma, yok etme ve proinflatuvar yanıtı başlatarak Th1 tipi immün yanıtın oluşumunu sağlama açısından kritik rol oynar. Bu süreçte TNF, interferonlar, IL-23, IL-18 ve IL-12 gibi sitokinlerin yanı sıra, T lenfositleri, doğal öldürücü (NK) hücreler ve makrofajlar aktive olur (Bergsbaken vd., 2009). *L. rhamnosus* kaynaklı metabolitlerin de virüslerin hücre hatlarına tutunmasını engellediği gösterilmiştir (Kalinichenko vd., 2020). Probiyotik bakteriler tarafından üretilen organik asitler, özellikle virüslerin yüzeyindeki spike glikoproteinlerine bağlanarak anjiyotensin dönüştürücü enzim 2 (ACE2) reseptörüne tutunmalarını engeller. Laurik asit ve miristik asit gibi yağ asitlerinin viral replikasyonu belirgin biçimde inhibe ettiği bildirilmektedir (Gurung vd., 2021; Mali vd., 2020).

4.2. Antibakteriyel Etkileri

Postbiyotiklerin temel biyolojik aktif bileşenleri; laktik asit, asetik asit, tartarik asit, malik asit ve sitrik asit gibi organik asitlerdir. Bu bileşenler pH'ı düşürerek ve hücre zarının bütünlüğünü bozarak bakteriyel büyümeyi engeller. Bakteriyosinler ise bakterilerin sitoplazmik zarını hedef alarak hücre geçirgenliğini artırır ve bakteriyel canlılığı azaltır. Laurik ve miristik asit gibi kısa zincirli yağ asitleri, bakteriyel büyümeyi ve biyofilm oluşumunu etkili bir şekilde inhibe eder. Bu asitler, elektron taşıma zincirini bozar, enzimlerin yapısını ve aktivitelerini değiştirir ve hücre proteinleri gibi

hassas bileşenlerde morfolojik değişimlere neden olur. Sonuç olarak, hücre lizisi meydana gelir ve bakteriyel zar geçirgenliği artar. Ayrıca bakteriler tarafından üretilen antibakteriyel peptitler, mikrobiyal zarları parçalayarak ve metabolik çekirdeklerin birikimini tetikleyerek güçlü bir antibakteriyel etki gösterir. Bu mekanizma, hücre içeriğinin sızmasına yol açan por oluşumu, hücre duvarını zayıflatan hidrolaz aktivasyonu ve zar asidifikasyonu gibi süreçleri içerir (Gurunathan vd., 2024; Yoon vd., 2018).

4.3. Antikanser Etkileri

Postbiyotiklerin antikanser özellikleri, hücre büyümesini ve çoğalmasını baskılaması, apoptotik süreçleri tetiklemesi ve immün yanıtı düzenlemesiyle ilişkilidir. Postbiyotiklerde bulunan SCFA'lar, mikrobiyal metabolitler, hücre fraksiyonları, EPS'ler ve fonksiyonel proteinler, özellikle kolon kanseri hücreleri üzerinde güçlü antikanser etki göstermektedir (Nowak vd., 2022). Bu etkiler, mutagenez ve karsinojen oluşumunun baskılanması, proapoptotik yolların aktivasyonu, bakteriyel translokasyonun azaltılması, apoptoz ve otofajinin artırılması yoluyla ortaya çıkar. Örneğin, propiyonibakteriler tarafından üretilen SCFA'ların, insan kolorektal kanser hücreleri (HT-29 ve Caco-2) üzerinde mitokondriyal zar potansiyelini düşürerek reaktif oksijen türleri üretimini artırdığı, kaspaz-3 aktivasyonunu tetiklediği ve kromatin yoğunlaşmasına yol açtığı bildirilmiştir (Jan vd., 2002). Isıl işlem uygulanmış laktik asit bakterilerinin sitoplazmik fraksiyonlarının ise hücresel bağışıklığı modüle ederek antitümör yanıtı güçlendirdiği görülmüştür (Lee vd., 2004).

4.4. Antiinflamatuvar Etkileri

Enflamasyon, organizmanın enfeksiyona karşı ilk savunma yanıtıdır; ancak aşırı veya kronik inflamasyon, inflamatuvar bağırsak hastalığı (IBD), artritis, gastrit, astım ve ateroskleroz gibi birçok hastalığın gelişiminde rol oynar. Bu hastalıkların ortak özelliği, hücre döngüsünün düzenlenmesinde görevli NF- κ B ve MAPK yollarının düzensizleşmesidir (McDaniel vd., 2016). Postbiyotiklerin bu yollar üzerindeki düzenleyici etkileri, aşırı inflamatuvar yanıtı baskılamak için umut verici bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Plaza-Díaz vd., 2017). MAPK sinyal yolları (JNK, ERK, p38) hücre ölümü, sitokin üretimi ve proliferasyonun düzenlenmesinde kilit rol oynar (Cargnello ve Roux, 2011). Postbiyotikler, proinflamatuvar genlerin transkripsiyonunu ve protein ekspresyonunu modüle ederek inflamatuvar süreçlerde güçlü bir düzenleyici etki oluşturur. Bu etki, kullanılan postbiyotiklerin kaynağına, bakteri türüne ve formuna (örneğin hücre serbest süpernatant veya ısı ile inaktive edilmiş bakteri) bağlı olarak değişir (Uchinaka vd., 2018).

Sonuç olarak, postbiyotiklerin fonksiyonel gıdalarda kullanımı hem tüketici sağlığını destekleyen hem de endüstriyel üretimde sürdürülebilirliği teşvik eden çift yönlü bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Önümüzdeki yıllarda yapılacak araştırmaların, postbiyotiklerin bileşimsel çeşitliliğini, hedefe özgü etki mekanizmalarını ve klinik etkinliklerini daha kapsamlı biçimde aydınlatması beklenmektedir. Böylelikle postbiyotikler, fonksiyonel gıda teknolojisinin güvenli, etkili ve bilime dayalı yeni nesil bileşenleri olarak, gıda aracılığıyla sağlık yaklaşımında önemli bir paradigma değişiminin temelini oluşturacaktır (Binda vd., 2020; Nataraj vd., 2020; Wei vd., 2024).

Kaynakça

- Abdalla, A. K., Ayyash, M. M., Olaimat, A. N., Osaili, T. M., Al-Nabulsi, A. A., Shah, N. P., & Holley, R. (2021). Exopolysaccharides as Antimicrobial Agents: Mechanism and Spectrum of Activity. *Frontiers in Microbiology*, 12, 664395.
- Aguilar-Toalá, J. E., Garcia-Varela, R., Garcia, H. S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A. E., Vallejo-Cordoba, B., & Hernández-Mendoza, A. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105–114.
- Ahmad Rather, I., Seo, B. J., Rejish Kumar, V. J., Choi, U. H., Choi, K. H., Lim, J. H., & Park, Y. H. (2013). Isolation and characterization of a proteinaceous antifungal compound from *Lactobacillus plantarum* YML007 and its application as a food preservative. *Letters in Applied Microbiology*, 57(1), 69–76.
- Angelin, J., & Kavitha, M. (2020). Exopolysaccharides from probiotic bacteria and their health potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 853–865.
- Arshad, F.-A., Mehmood, R., Hussain, S., Annus Khan, M., & Khan, M. S. (2018). Lactobacilli as Probiotics and their Isolation from Different Sources. *British Journal of Research*, 5(3), 43.
- Ayyash, M., Johnson, S. K., Liu, S. Q., Mesmari, N., Dahmani, S., Al Dhaheer, A. S., & Kizhakkayil, J. (2019). In vitro investigation of bioactivities of solid-state fermented lupin, quinoa and wheat using *Lactobacillus* spp. *Food Chemistry*, 275, 50–58.
- Baud, D., Dimopoulou Agri, V., Gibson, G. R., Reid, G., & Giannoni, E. (2020). Using Probiotics to Flatten the Curve of Coronavirus Disease COVID-2019 Pandemic. *Frontiers in Public Health*, 8, 186.
- Belguesmia, Y., Bendjeddou, K., Kempf, I., Boukherroub, R., & Drider, D. (2020). Heterologous Biosynthesis of Five New Class II Bacteriocins From *Lactobacillus paracasei* CNCM I-5369 With Antagonistic Activity Against Pathogenic *Escherichia coli* Strains. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1195.
- Bergsbaken, T., Fink, S. L., & Cookson, B. T. (2009). Pyroptosis: Host cell death and inflammation. *Nature Reviews Microbiology*, 7(2), 99–109.
- Binda, S., Hill, C., Johansen, E., Obis, D., Pot, B., Sanders, M. E., Tremblay, A., & Ouwehand, A. C. (2020). Criteria to Qualify Microorganisms as “Probiotic” in Foods and Dietary Supplements. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1662.
- Cargnello, M., & Roux, P. P. (2011). Activation and Function of the MAPKs and Their Substrates, the MAPK-Activated Protein Kinases. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 75(1), 50–83.

- Chaney, W. E., Naqvi, A., Gutierrez, M., Gernat, A., Johnson, T. J., & Petry, D. (2022). Dietary Inclusion of a *Saccharomyces cerevisiae*-Derived Postbiotic Is Associated with Lower *Salmonella enterica* Burden in Broiler Chickens on a Commercial Farm in Honduras. *Microorganisms*, 10(3), 544.
- Cizeikiene, D., & Jagelaviciute, J. (2021). Investigation of Antibacterial Activity and Probiotic Properties of Strains Belonging to *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* Genera for Their Potential Application in Functional Food and Feed Products. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 13(5), 1387–1403.
- Contesini, F. J., Melo, R. R. de, & Sato, H. H. (2018). An overview of *Bacillus* proteases: from production to application. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(3), 321–334.
- Daba, G. M., Elnahas, M. O., & Elkhateeb, W. A. (2021). Contributions of exopolysaccharides from lactic acid bacteria as biotechnological tools in food, pharmaceutical, and medical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 173, 79–89.
- de Lima, A. L., Guerra, C. A., Costa, L. M., de Oliveira, V. S., Junior, W. J. F. L., Luchese, R. H., & Guerra, A. F. (2022). A Natural Technology for Vacuum-Packaged Cooked Sausage Preservation with Potentially Postbiotic-Containing Preservative. *Fermentation*, 8(3), 111.
- Fattahi, Y., Heidari, H. R., & Khosroushahi, A. Y. (2020). Review of short-chain fatty acids effects on the immune system and cancer. *Food Bioscience*, 38, 100793.
- Frederick, M. R., Kuttler, C., Hense, B. A., & Eberl, H. J. (2011). A mathematical model of quorum sensing regulated EPS production in biofilm communities. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 8(1), 8.
- Gentès, M. C., Turgeon, S. L., & St-Gelais, D. (2016). Impact of starch and exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria on the properties of set and stirred yoghurts. *International Dairy Journal*, 55, 79–86.
- Gurunathan, S., Thangaraj, P., & Kim, J. H. (2024). Postbiotics: Functional Food Materials and Therapeutic Agents for Cancer, Diabetes, and Inflammatory Diseases. *Foods*, 13(1), 89.
- Gurung, A. B., Ali, M. A., Lee, J., Farah, M. A., & Al-Anazi, K. M. (2021). Identification of potential SARS-CoV-2 entry inhibitors by targeting the interface region between the spike RBD and human ACE2. *Journal of Infection and Public Health*, 14(2), 227–237.
- İncili, G. K., Karatepe, P., Akgöl, M., Güngören, A., Koluman, A., İlhak, O. İ., Kanmaz, H., Kaya, B., & Hayaloğlu, A. A. (2022). Characterization of lactic acid bacteria postbiotics, evaluation in-vitro antibacterial effect, microbial and chemical quality on chicken drumsticks. *Food Microbiology*, 104, 103975.

- Isaac-Bamgboye, F. J., Mgbechidinma, C. L., Onyeaka, H., Isaac-Bamgboye, I. T., & Chukwugozie, D. C. (2024). Exploring the Potential of Postbiotics for Food Safety and Human Health Improvement. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2024, 5594235.
- Jan, G., Belzacq, A.-S., Haouzi, D., Rouault, A., Métivier, D., Kroemer, G., & Brenner, C. (2002). Propionibacteria induce apoptosis of colorectal carcinoma cells via short-chain fatty acids acting on mitochondria. *Cell Death and Differentiation*, 9(2), 179–188.
- Jensen, G. S., Benson, K. F., Carter, S. G., & Endres, J. R. (2010). Ganeden-BC30 cell wall and metabolites: anti-inflammatory and immune modulating effects in vitro. *BMC Immunology*, 11, 15.
- Kalinichenko, S. V., Melentyev, K. V., Mancee, H., Dubinina, N. V., Zvereva, N. V., Toryanik, I. I., Popova, N. G., & Pakhomov, O. V. (2020). Study of anti-virus actions of metabolites of lactobacteria. *Wiadomości Lekarskie*, 73(7), 1484–1488.
- Kapustian, V., Namazov, A., Yaakov, O., Volodarsky, M., Anteby, E. Y., & Gemmer, O. (2018). Is intrauterine device a risk factor for failure of conservative management in patients with tubo-ovarian abscess? An observational retrospective study. *Archives of Gynecology and Obstetrics*, 297(5), 1201–1204.
- Kim, S. W., Kang, S. I., Shin, D. H., Oh, S. Y., Lee, C. W., Yang, Y., Son, Y. K., Yang, H. S., Lee, B. H., An, H. J., Jeong, I. S., & Bang, W. Y. (2020). Potential of cell-free supernatant from lactobacillus plantarum nibr97, including novel bacteriocins, as a natural alternative to chemical disinfectants. *Pharmaceuticals*, 13(10), 314.
- Lee, C. S., & Kim, S. H. (2020). Anti-inflammatory and Anti-osteoporotic Potential of Lactobacillus plantarum A41 and L. fermentum SRK414 as Probiotics. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 12(2), 623–634.
- Lee, I. C., Caggianiello, G., van Swam, I. I., Taverne, N., Meijerink, M., Bron, P. A., Spano, G., & Kleerebezem, M. (2016). Strain-specific features of extracellular polysaccharides and their impact on Lactobacillus plantarum-host interactions. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(13), 3959–3970.
- Lee, J. Y., Kim, Y. G., Kim, J. I., Lee, H. Y., Moon, G. S., & Kang, C. H. (2022). Improvements in Human Keratinocytes and Antimicrobial Effect Mediated by Cell-Free Supernatants Derived from Probiotics. *Fermentation*, 8(7), 332.
- Lee, J.-W., Shin, J.-G., Kim, E. H., Kang, H. E., Yim, I. B., Kim, J. Y., Joo, H.-G., & Woo, H. J. (2004). Immunomodulatory and antitumor effects in vivo by the cytoplasmic fraction of Lactobacillus casei and Bifidobacterium longum. *Journal of Veterinary Science*, 5(1), 41–48.

- Mali, J. K., Sutar, Y. B., Pahelkar, A. R., Verma, P. M., & Telvekar, V. N. (2020). Novel fatty acid-thiadiazole derivatives as potential antimycobacterial agents. *Chemical Biology & Drug Design*, 95(1), 174–181.
- Mani-López, E., Arrijoja-Bretón, D., & López-Malo, A. (2022). The impacts of antimicrobial and antifungal activity of cell-free supernatants from lactic acid bacteria in vitro and foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 604–641.
- McDaniel, K., Hall, C., Sato, K., Lairmore, T., Marzioni, M., Glaser, S., Meng, F., & Alpini, G. (2016). Lin28 and let-7: roles and regulation in liver diseases. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 310*(10), G757–G765.
- Mishra, B., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Yadavalli, R., Agrawal, D. C., Reddy, H. P., Gorrepati, R., Reddy, C. N., Mandal, S. K., Shamim, M. Z., & Panda, J. (2024). Postbiotics: the new horizons of microbial functional bioactive compounds in food preservation and security. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1), 21.
- Moradi, M., Kousheh, S. A., Almasi, H., Alizadeh, A., Guimarães, J. T., Yılmaz, N., & Lotfi, A. (2020). Postbiotics produced by lactic acid bacteria: The next frontier in food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3390–3415.
- Nataraj, B. H., Ali, S. A., Behare, P. V., & Yadav, H. (2020). Postbiotics-parabiotics: The new horizons in microbial biotherapy and functional foods. *Microbial Cell Factories*, 19(1), 168.
- Nowak, A., Zakłós-Szyda, M., Rosicka-Kaczmarek, J., & Motyl, I. (2022). Anticancer Potential of Post-Fermentation Media and Cell Extracts of Probiotic Strains: An In Vitro Study. *Cancers*, 14(7), 1853.
- Oerlemans, M. M. P., Akkerman, R., Ferrari, M., Walvoort, M. T. C., & de Vos, P. (2021). Benefits of bacteria-derived exopolysaccharides on gastrointestinal microbiota, immunity and health. *Journal of Functional Foods*, 76, 104289.
- Pahumunto, N., & Teanpaisan, R. (2023). Anti-cancer Properties of Potential Probiotics and Their Cell-free Supernatants for the Prevention of Colorectal Cancer: an In Vitro Study. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 15(5), 1137–1150.
- Perez, R. H., Zendo, T., & Sonomoto, K. (2014). Novel bacteriocins from lactic acid bacteria (LAB): Various structures and applications. *Microbial Cell Factories*, 13(Suppl 1), S3.
- Piermaria, J., Diosma, G., Aquino, C., Garrote, G., & Abraham, A. (2015). Edible kefir films as vehicle for probiotic microorganisms. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 193–199.

- Plaza-Díaz, J., Ruiz-Ojeda, F. J., Vilchez-Padial, L. M., & Gil, A. (2017). Evidence of the anti-inflammatory effects of probiotics and synbiotics in intestinal chronic diseases. *Nutrients*, 9(6), 555.
- Rad, A. H., Aghebati-Maleki, L., Kafil, H. S., & Abbasi, A. (2021). Molecular mechanisms of postbiotics in colorectal cancer prevention and treatment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(11), 1787–1803.
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska, H., & Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(9), 649–667.
- Samer, A., Toumi, R., Soufli, I., & Touil-Boukoffa, C. (2022). Cell-free probiotic supernatant (CFS) treatment alleviates indomethacin-induced enterocolopathy in BALB/c mice by down-modulating inflammatory response and oxidative stress: potential alternative targeted treatment. *Inflammopharmacology*, 30(5), 1685–1703.
- Shahali, A., Soltani, R., & Akbari, V. (2023). Probiotic Lactobacillus and the potential risk of spreading antibiotic resistance: A systematic review. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 18(5), 468–477.
- Singh, N., Kaur, R., Singh, B. P., Rokana, N., Goel, G., Puniya, A. K., & Panwar, H. (2020). Impairment of Cronobacter sakazakii and Listeria monocytogenes biofilms by cell-free preparations of lactobacilli of goat milk origin. *Folia Microbiologica*, 65(1), 185–196.
- Singh, T. P., Kaur, G., Kapila, S., & Malik, R. K. (2017). Antagonistic activity of Lactobacillus reuteri strains on the adhesion characteristics of selected pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 8, 486.
- Singhania, R. R., Patel, A. K., Pandey, A., & Ganansounou, E. (2017). Genetic modification: A tool for enhancing beta-glucosidase production for biofuel application. *Bioresource Technology*, 245, 1352–1361.
- Sokol, H., Pigneur, B., Watterlot, L., Lakhdari, O., Bermúdez-Humarán, L. G., Gratadoux, J.-J., Blugeon, S., Bridonneau, C., Furet, J.-P., Corthier, G., Grangette, C., Vasquez, N., Pochart, P., Trugnan, G., Thomas, G., Blotière, H. M., Doré, J., Marteau, P., Seksik, P., & Langella, P. (2008). Faecalibacterium prausnitzii is an anti-inflammatory commensal bacterium identified by gut microbiota analysis of Crohn disease patients. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(43), 16731–16736.
- Soltani, S., Hammami, R., Cotter, P. D., Rebuffat, S., Said, L. B., Gaudreau, H., Bédard, F., Biron, E., Drider, D., & Fliss, I. (2021). Bacteriocins as a new generation of antimicrobials: Toxicity aspects and regulations. *FEMS Microbiology Reviews*, 45(1), fuaa039.

- Sundararaman, A., Ray, M., Ravindra, P. V., & Halami, P. M. (2020). Role of probiotics to combat viral infections with emphasis on COVID-19. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(19), 8089–8104.
- Tejada-Simon, M. V., Lee, J. H., Ustunol, Z., & Pestka, J. J. (1999). Ingestion of yogurt containing *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium* to potentiate immunoglobulin A responses to cholera toxin in mice. *Journal of Dairy Science*, 82(4), 649–660.
- Thorakkattu, P., Khanashyam, A. C., Shah, K., Babu, K. S., Mundanat, A. S., Deliephan, A., Deokar, G. S., Santivarangkna, C., & Nirmal, N. P. (2022). Postbiotics: Current Trends in Food and Pharmaceutical Industry. *Foods*, 11(19), 3094.
- Tomasik, P., & Tomasik, P. (2020). Probiotics, non-dairy prebiotics and postbiotics in nutrition. *Applied Sciences*, 10(4), 1470.
- Uchinaka, A., Azuma, N., Mizumoto, H., Nakano, S., Minamiya, M., Yoneda, M., Aoyama, K., Komatsu, Y., Yamada, Y., Murohara, T., & Nagata, K. (2018). Anti-inflammatory effects of heat-killed *Lactobacillus plantarum* L-137 on cardiac and adipose tissue in rats with metabolic syndrome. *Scientific Reports*, 8(1), 8156.
- Vinderola, G., Sanders, M. E., & Salminen, S. (2022). The Concept of Postbiotics. *Foods*, 11(8), 1077.
- Wei, L., Wang, B., Bai, J., Zhang, Y., Liu, C., Suo, H., & Wang, C. (2024). Postbiotics are a candidate for new functional foods. *Food Chemistry: X*, 23, 101624.
- Xu, Y., Cui, Y., Yue, F., Liu, L., Shan, Y., Liu, B., Zhou, Y., & Lü, X. (2019). Exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria and *Bifidobacteria*: Structures, physiochemical functions and applications in the food industry. *Food Hydrocolloids*, 94, 475–499.
- Yoon, B. K., Jackman, J. A., Valle-González, E. R., & Cho, N. J. (2018). Antibacterial free fatty acids and monoglycerides: Biological activities, experimental testing, and therapeutic applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(4), 1114.
- Zhong, Y., Wang, T., Luo, R., Liu, J., Jin, R., & Peng, X. (2024). Recent advances and potentiality of postbiotics in the food industry: Composition, inactivation methods, current applications in metabolic syndrome, and future trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(17), 5768–5792.
- Żółkiewicz, J., Marzec, A., Ruszczyński, M., & Feleszko, W. (2020). Postbiotics—a step beyond pre-and probiotics. *Nutrients*, 12(8), 2189.

Fenolik Bileşikler: Fonksiyonel Gıdalardaki Rolü ve Sağlık Faydaları

Hilal Yılmaz¹

Özet

Bu bölüm, fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıdalardaki rolünü, sağlık üzerindeki etkilerini ve gıda bileşenleriyle etkileşim mekanizmalarını bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Fenolik bileşiklerin bitkilerde doğal olarak sentezlendiği, çevresel stres faktörlerine karşı koruyucu görev üstlendiği ve gıdaların renk, aroma ve lezzet profillerine katkı sağladığı vurgulanmaktadır. Flavonoidler, fenolik asitler, tanenler, stilbenler ve lignanlar başta olmak üzere temel fenolik sınıflar ayrıntılı biçimde tanıtılmakta; bu sınıfların antioksidan, antiinflamatuvar, antimikrobiyal, kardiyovasküler ve antikanser etkileri bilimsel bulgular ışığında değerlendirilmektedir.

Bölümde ayrıca fenolik bileşiklerin proteinler, lipitler ve karbonhidratlar gibi gıda makromolekülleri ile etkileşimleri ele alınmakta; bu etkileşimlerin gıdanın fonksiyonelliği, stabilitesi ve biyoyararlanımı üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Protein–fenolik bileşik komplekslerinin çözünürlük ve yapı değişimlerine neden olabileceği, lipitlerle etkileşimlerin ise oksidatif stabiliteyi artırdığı belirtilmektedir. pH, sıcaklık, iyonik kuvvet ve çözücü ortamı gibi çevresel faktörlerin bu etkileşimleri doğrudan etkilediği vurgulanmaktadır.

Ayrıca meyve, sebze, tahıllar, baklagiller, yağlı tohumlar, çay, kahve, kakao ve süt ürünlerindeki fenolik bileşik profilleri sunulmakta; gıda işleme tekniklerinin fenolik stabilite üzerindeki etkileri irdelenmektedir. Son olarak, mikroenkapsülasyon ve nanoteknoloji temelli yaklaşımlar gibi yenilikçi yöntemlerin fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıdalardaki etkinliğini artırma potansiyeli tartışılmakta ve gelecekteki araştırma yönelimleri ortaya konmaktadır.

1 Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, hilalyilmaz@bartin.edu.tr, 0000-0002-0399-355X

1. Fenolik Bileşiklerin Tanımı ve Genel Özellikleri

Fenolik bileşikler, bitkilerde doğal olarak bulunan ve bir veya daha fazla fenol halkası içeren kimyasal bileşiklerdir. Bu bileşikler, bitkilerin savunma mekanizmalarının bir parçası olarak sentezlenir ve çevresel stres faktörlerine, ultraviyole ışığa, patojenlere ve otçullara karşı koruma sağlar (Durazzo vd., 2019). Fenolik bileşikler, bitkisel gıdaların renk, aroma ve lezzet gibi duyuşal özelliklerini belirlemede önemli rol oynar (Harnly, Bhagwat, ve Lin, 2007).

Fenolik bileşikler, gıda ve sağlık alanında giderek daha fazla ilgi gören biyoaktif bileşiklerdir. Özellikle antioksidan özellikleri sayesinde, oksidatif stresin neden olduğu hastalıklara karşı koruyucu etkileri olduğu bilinmektedir (Graf, Milbury, ve Blumberg, 2005). Fenolik bileşiklerin serbest radikalleri nötralize etme kapasiteleri, inflamasyonu azaltıcı, antimikrobiyal, antikanser ve kardiyovasküler hastalıklara karşı koruyucu etkileri ile dikkat çeker (Beara vd., 2012; Zimmer vd., 2012; Silva, Rodrigues, Feas, ve Estevinho, 2012). Gıdalarda doğal olarak bulunan bu bileşikler, aynı zamanda gıda işleme sürecinde değişime uğrayarak gıdanın fonksiyonel özelliklerini ve besin değerini etkilemektedir (Scalbert ve Williamson, 2000)

2. Fenolik Bileşiklerin Kimyasal Yapısı ve Etkileşim Mekanizmaları

2.1. Temel Fenolik Bileşik Sınıfları

Fenolik bileşikler, kimyasal yapılarında en az bir aromatik halka ve bir veya daha fazla hidroksil (-OH) grubu içeren organik bileşiklerdir. Bu yapı, onların biyolojik aktivitelerini belirler. Fenolik bileşikler, bitkilerde yaygın olarak bulunan ve birçok biyolojik işlevi olan bir bileşik grubudur. Tablo 1'de temel fenolik bileşik sınıfları ve biyolojik etkileri özetlenmiştir. Kimyasal yapıları temel alınarak şu ana sınıflara ayrılırlar:

- **Flavonoidler:** Bitkilerde en yaygın bulunan polifenoller olup, güçlü antioksidan, antiinflamatuvar ve antimikrobiyal özellikleriyle dikkat çeker. Temel kimyasal yapıları iki aromatik halka (A ve B) ile bir oksijen içeren heterosiklik C halkasından oluşur. Yapısal farklılıklarına göre flavonoller, flavonlar, flavanonlar, flavanoller (flavan-3-oller), izoflavonoidler ve antosiyaninler olmak üzere altı ana gruba ayrılırlar (Mark vd., 2019). Bu alt gruplar, serbest radikallerin nötralizasyonu, bağışıklık sisteminin desteklenmesi, kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi ve hormonal denge gibi çeşitli biyolojik fonksiyonlara sahiptir (Albuquerque vd., 2021). Örneğin, flavanonlar özellikle narenciye meyvelerinde bulunurken, flavonoller sebzelerde, flavanoller yeşil çay ve kakaoda, izoflavonoidler ise baklagillerde yaygın olarak

bulunur. Antosiyaninler ise kırmızı-mor renkli meyve ve sebzelere renk verirken, aynı zamanda hücrel oksidatif hasarı önleyici özellikleri ile öne çıkar. Geniş bir biyolojik aktivite yelpazesine sahip olmaları nedeniyle flavonoidler, fonksiyonel gıdalar, takviye edici gıdalar ve ilaç sanayisinde büyük ilgi görmekte olup, sağlık üzerindeki etkilerini doğrulamak için klinik çalışmalar devam etmektedir.

- **Fenolik Asitler:** En basit fenolik bileşik sınıflarından biri olup, temel yapılarında bir fenolik halka ve bir karboksilik asit fonksiyonel grubu içerirler. Karbon iskeletlerine göre iki ana gruba ayrılırlar: hidroksibenzoik asitler (C₆-C₁) ve hidroksisinnamik asitler (C₆-C₃). Hidroksibenzoik asitler, benzoik asit türevleri olup, gallik asit, vanilik asit ve protokatekuik asit gibi bileşikler içerir (Durazzo vd., 2019). Bu bileşikler, özellikle meyveler, çay ve bazı tahıllarda bulunur ve güçlü antioksidan özellikleri ile bilinirler (Heleno vd., 2015). Hidroksisinnamik asitler ise sinamik asit türevlerinden türetilir ve daha yaygın olarak sebzelerde, meyvelerde ve tahıllarda bulunur. Kafeik asit, ferulik asit ve p-kumarik asit gibi bileşikler bu gruba dahildir. Bu bileşikler, serbest radikal temizleyici özellikleri ile hücrel oksidatif stresi azaltabilir ve inflamasyon süreçlerini düzenleyebilir. Genel olarak, fenolik asitler antioksidan, antiinflamatuvar ve antimikrobiyal özellikleri sayesinde hücrel savunma mekanizmalarını destekleyerek, kardiyovasküler hastalıklar, diyabet ve kanser gibi kronik hastalıklara karşı koruyucu etki gösterebilirler (Albuquerque vd., 2021). Bu özellikleri nedeniyle, fonksiyonel gıda ve ilaç sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler.
- **Tanenler:** Bitkilerde yaygın olarak bulunan ve özellikle bazı meyvelere buruk ve acı bir tat veren büyük fenolik polimerlerdir. Kimyasal yapıları oldukça karmaşık olup, hidrolize edilebilir tanenler ve yoğun (kondanse) tanenler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar (Durazzo vd., 2019). Hidrolize edilebilir tanenler, ellagik asit ve gallik asit gibi basit fenoller ile bir karbonhidratın birleşiminden oluşur. Asidik veya bazik koşullara maruz kaldıklarında, fenolik asitler ve karbonhidratlara ayrışabilirler. Örneğin, gallotaninler hidroliz edildiğinde gallik asit açığa çıkar. Yoğun tanenler (kondanse tanenler) ise flavan-3-ol monomerlerinin bir araya gelerek oluşturduğu büyük polimer yapılarından oluşur. Bu bileşikler, flavanol ünitelerinin A halkaları ile diğer flavanollerin pirandan halkası arasındaki bağlarla birleşmesiyle oluşur (Durazzo vd., 2019). Biyolojik aktiviteleri konusunda daha az araştırma yapılmış olmasına rağmen, son yıllarda proantosiyanidinler, güçlü antioksidan özellikleri ve sağlık yararları nedeniyle dikkat

çekmektedir (Albuquerque vd., 2021). Tanenlerin antiinflamatuvar, antimikrobiyal ve kardiyovasküler hastalıkları önleyici etkileri, fonksiyonel gıdalar ve ilaç sanayisinde potansiyel kullanım alanları sunmaktadır.

- **Stilbenler:** C₆-C₂-C₆ yapısına sahip fenolik bileşikler olup, iki benzen halkası çift bağ ile bağlanmıştır. Merkezi çift bağın konumuna göre Z ve E izomerleri olarak sınıflandırılır; E izomerleri genellikle daha yüksek biyolojik aktiviteye sahiptir (Mark vd., 2019). Bu bileşikler, bitkilerin çevresel stres faktörlerine karşı savunma mekanizmalarında önemli rol oynar ve belirli bitki türlerinde sentezlenir. Hastalıklara, ultraviyole ışığa ve patojenlere karşı koruma sağlar. Antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleri sayesinde insan sağlığı üzerinde de olumlu etkiler gösterebilir (Mark et al, 2019). Resveratrol, en bilinen stilben bileşiğidir ve özellikle üzüm kabukları, kırmızı şarap, yer fıstığı ve bazı çilek türlerinde bulunur. Resveratrol, kardiyovasküler sağlığı destekleyici etkileriyle öne çıkmakta olup, damar genişletici, antioksidan ve antiinflamatuvar özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, nörodejeneratif hastalıkları önlemede, yaşlanmayı geciktirmede ve kanser karşıtı etkiler göstermede potansiyel bir bileşik olarak geniş çapta araştırılmaktadır (Albuquerque vd., 2021).
- **Lignanlar:** Bitkisel kaynaklı fitoöstrojenler arasında yer alan lignanlar, bağırsak mikrobiyotası tarafından metabolize edilerek biyolojik olarak aktif bileşiklere dönüşebilirler. Kimyasal olarak, fenilpropanoid dimerlerinin (C₆-C₃) birleşmesiyle oluşurlar ve bu yapılar yan zincirlerinin merkezi karbonları aracılığıyla bağlanmıştır (Durazzo vd., 2019). Lignanlar, özellikle keten tohumu, susam, tam tahıllar ve bazı sebzelerde bulunur. Bu bileşikler, östrojenik ve antiöstrojenik aktiviteler gösterebilmekte, dolayısıyla hormonal dengeyi etkileyerek menopoz semptomlarını hafifletmekte ve hormonla ilişkili kanser türlerine karşı koruma sağlayabilmektedir (Caleja vd., 2017). Ayrıca, antioksidan, antiinflamatuvar ve kardiyovasküler sağlığı destekleyici etkileri ile de dikkat çekerler. Günümüzde lignanların sağlık üzerindeki etkileri, özellikle bağırsak mikrobiyotası ile etkileşimleri açısından araştırılmakta olup, fonksiyonel gıdalarda ve takviye edici ürünlerde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Tablo 1. Temel Fenolik Bileşik Sınıfları ve Biyolojik Etkileri

<i>Fenolik Bileşik Sınıfı</i>	<i>Örnek Bileşikler</i>	<i>Temel Kaynaklar</i>	<i>Biyolojik Etkileri</i>	<i>Referans</i>
<i>Flavonoidler</i>	Kaempferol, Mirisetin, Kuersetin, Luteolin, Apigenin, Naringenin, Hesperidin, Kateşin, Epikateşin, Genistein, Daidzein, Siyanidin, Delfinidin, Pelargonidin	Çay, narenciye, kakao, sebzeler, kırmızı-mor meyveler, baklagiller	Kardiyovasküler koruma, antioksidan, antiinflamatuvar, hormonal denge	Durazzo vd., 2019 Ma vd., 2023 Oluwole vd., 2022
<i>Fenolik Asitler</i>	Kafeik asit, Ferulik asit, p-Kumarik asit, Gallik asit, Vanilik asit, Protokatekuik asit	Meyveler, sebzeler, tahıllar, çay	Antioksidan, antimikrobiyal, inflamasyon düzenleyici	Durazzo vd., 2019 Heleno vd., 2015 Albuquerque vd., 2021
<i>Tanenler</i>	Gallotanin, Ellajik asit, Proantosiyanidinler, Epigallocatechin gallate	Çay, üzüm kabukları, bazı meyveler	Antioksidan, antimikrobiyal, kardiyovasküler koruma	Oluwole vd., 2022 Caleja vd., 2017
<i>Stilbenler</i>	Resveratrol	Üzüm, kırmızı şarap, yer fıstığı, çilek	Kardiyoprotektif, antiinflamatuvar, nöroprotektif, yaşlanma karşıtı	Durazzo vd., 2019
<i>Lignanlar</i>	Sekoisolaricrezinol, Matairezinol	Keten tohumu, susam, tam tahıllar, sebzeler	Fitoöstrojenik etki, hormonal denge, kardiyovasküler destek	Durazzo vd., 2019 Mark vd., 2019

2.2. Fenolik Bileşiklerin Gıda Makromolekülleri ile Etkileşimi ve Çevresel Faktörlerin Etkileri

Fenolik bileşikler, gıdalardaki proteinler, lipitler ve karbonhidratlar gibi makromoleküllerle etkileşime girerek besin değerini, duysal özellikleri ve fonksiyonel özellikleri etkilemektedir. Bu etkileşimler, gıda bileşenlerinin fizikokimyasal stabilitesini ve biyoyararlanımını değiştirerek fonksiyonel gıdaların etkinliğini belirlemede önemli bir rol oynar (Ozdal vd., 2013).

Fenolik bileşikler, proteinlerle farklı türde bağlanma mekanizmaları aracılığıyla etkileşime girerek proteinlerin fizikokimyasal özelliklerini ve fonksiyonel davranışlarını değiştirebilmektedir. Genellikle hidrojen bağları, hidrofobik etkileşimler ve van der Waals kuvvetleri yoluyla gerçekleşen bu etkileşimler, bazı durumlarda oksidatif bağlar aracılığıyla kovalent kompleksler de oluşturur (Ozdal vd., 2013). Fenolik bileşiklerin proteinlerle reaksiyona girmesi, proteinlerin çapraz bağlanmasını (cross-linking) teşvik

eder. Bu çapraz bağlanmalar, protein moleküllerinin net yükünü değiştirerek çözünürlüğünü etkileyebilir. Örneğin, tanenler gibi belirli fenolik bileşikler, proteinlerle kompleks oluşturarak çözünmeyen bileşiklerin meydana gelmesine neden olur ve bu durum proteinlerin biyoyararlanımını azaltır (Zhang vd., 2020). Protein-fenolik bileşik etkileşimleri, yapısal değişimler ve fonksiyonel özellikler açısından kritik bir rol oynar. Fenolik bileşiklerle etkileşim sonucunda proteinlerin α -heliks ve β -tabaka oranları değişebilir, bu da onların üç boyutlu yapısını etkileyerek çözünürlüğünü artırabilir veya azaltabilir (Kanakis vd., 2011). Bu etkileşimler sonucu proteinlerin ikincil (secondary) ve üçüncül (tertiary) yapılarında meydana gelen değişiklikler, moleküllerin yüzey özelliklerini etkileyerek proteinlerin daha hidrofilik veya daha hidrofobik hale gelmesine yol açar. Böylece proteinlerin emülsifiye edici, jel oluşturu ve su tutma kapasitesi gibi fonksiyonel özelliklerini değiştirebilir (Rawel vd., 2002). Bununla birlikte, bazı fenolik bileşiklerin protein yapısını stabilize ettiği ve enzim aktivitesini modüle ederek fonksiyonel özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir (Lv vd., 2021).

Fenolik bileşiklerin lipitlerle etkileşimi ise gıdaların oksidatif stabilitesini etkilemektedir. Lipit oksidasyonu, raf ömrünü kısaltan ve kalite kaybına yol açan en önemli süreçlerden biridir. Fenolik bileşikler, serbest radikalleri nötralize ederek lipit oksidasyonunu önleyebilir veya yavaşlatabilir (Smith, 2012). Böylece, fonksiyonel gıdaların bozulmasını engelleyerek duysal ve besinsel özelliklerin korunmasına katkıda bulunurlar. Bunun yanı sıra, fenolik bileşikler karbonhidratlar, vitaminler ve minerallerle de etkileşime girebilmektedir. Örneğin, bazı fenolik bileşiklerin diyet lifleriyle etkileşimi, onların bağırsakta emilimini değiştirerek biyoyararlanımlarını etkiler (Zhang vd., 2020). Ayrıca, fenolik bileşiklerin demir ve çinko gibi minerallerle şelat oluşturması, bu minerallerin emilimini azaltarak biyoyararlanımını sınırlayabilir (Ozda vd., 2013).

Fenolik bileşiklerin makromoleküllerle olan etkileşimleri, çevresel faktörlerden büyük ölçüde etkilenir. pH değişimi, proteinlerin ve fenolik bileşiklerin iyonizasyon durumunu değiştirerek etkileşimlerin şiddetini artırabilir veya azaltabilir. Özellikle protein-fenolik bileşik kompleksleri, proteinin izoelektrik noktasına yakın pH seviyelerinde daha güçlüdür (Rawel vd., 2005). Benzer şekilde, sıcaklık değişiklikleri proteinlerin yapısını etkileyerek fenolik bileşiklerle olan etkileşimlerini artırabilir veya azaltabilir. Yüksek sıcaklıklarda proteinlerin denatüre olması, etkileşimleri güçlendirirken, çok yüksek sıcaklıklar fenolik bileşiklerin oksidatif bozulmasına neden olmaktadır (Ozda vd., 2013). Bunun yanı sıra, iyonik kuvvet ve çözücü ortamı gibi faktörler de protein-fenolik etkileşimlerini doğrudan etkilemektedir. Ortamdaki tuz konsantrasyonu, elektrostatik

etkileşimleri değiştirerek komplekslerin stabilitesini etkiler. Yüksek tuz konsantrasyonu genellikle etkileşimleri zayıflatırken, çözücü ortamının bileşimi de fenolik bileşiklerin çözünürlüğünü ve bağlanma kapasitesini değiştirir (Zhang vd., 2021). Örneğin, etanol gibi organik çözücüler, fenolik bileşiklerin çözünürlüğünü artırarak proteinlerle olan etkileşimleri modüle eder (Günel-Köroğlu vd., 2022). Bu faktörlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıdalarda daha verimli ve stabil bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Uygun pH seviyelerinin belirlenmesi, proteinler ve fenolik bileşikler arasındaki optimum etkileşimi destekleyerek istenilen fonksiyonel özelliklerin korunmasına yardımcı olur. Benzer şekilde, sıcaklık ve ortam koşullarının ayarlanması, fenolik bileşiklerin oksidatif bozulmasını önleyerek biyoyararlanımlarını ve fonksiyonel etkinliklerini artırır (Saricaoglu vd., 2023).

Sonuç olarak, fenolik bileşiklerin proteinler, lipidler ve diğer biyoaktif bileşiklerle olan etkileşimleri, gıda stabilitesini ve fonksiyonelliğini belirleyen kritik faktörlerden biridir. Bu etkileşimleri optimize etmek, fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıdalarda etkinliğini artırarak besinsel ve duyuşsal özellikleri geliştirmek açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

3. Fonksiyonel Gıdalarda Fenolik Bileşikler ve Uygulamalar

Fenolik bileşikler, bitkisel gıdalarda doğal olarak bulunan biyoaktif bileşiklerdir ve antioksidan, antiinflamatuar, antimikrobiyal, kardiyovasküler koruyucu ve kanser önleyici etkileri nedeniyle sağlık açısından büyük ilgi görmektedirler. Bu bileşikler, farklı gıda kaynaklarından elde edilerek çeşitli fonksiyonel gıda formülasyonlarında kullanılır. Tablo 2'de çeşitli gıda kaynaklarındaki fenolik bileşikler ve potansiyel sağlık etkileri verilmiştir.

Tablo 2. Gıda Kaynaklarındaki Fenolik Bileşikler ve Potansiyel Sağlık Etkileri

Fenolik Bileşik Kaynağı	İçerdiği Fenolik Bileşikler	Potansiyel Sağlık Etkileri	Referans
Meyveler (Üzüm, Çilek, Ahududu, Yaban Mersini)	Resveratrol, Antosiyaninler, Flavonoidler	Antioksidan, Kardiyovasküler Koruma	Imeh ve Khokhar, 2002 Ignat vd., 2011 Haminiuk vd., 2012 Macheix, 2018):
Meyveler (Elma, Armut)	Flavonoller (Quercetin, Kaempferol), Fenolik Asitler (Kafeik Asit, Klorojenik Asit)	Antioksidan, Anti-enflamatuvar	
Meyveler (Nar)	Gallik Asit, Ellagik Asit, Punikalagin	Antioksidan, Kanser Önleyici	
Sebzeler (Brokoli, Lahana, Ispanak)	Quercetin, Kaempferol, Glukozinolatlar	Kanser Önleyici, Antioksidan	Rashmi ve Negi, 2020 Ignat vd., 2011
Sebzeler (Domates, Biber)	Likopen, Flavonoller, Kapsaisin	Antioksidan, Kardiyovasküler Destek	
Sebzeler (Soğan, Sarımsak)	Quercetin, Luteolin, Kükürt Bileşikleri	Bağışıklık Güçlendirici, Anti-enflamatuvar	
Tam Tahıllar (Buğday, Çavdar, Arpa, Yulaf)	Ferulik Asit, p-Kumarik Asit	Antioksidan, Metabolik Destek	Xu vd., 2020 Van Hung, 2016
Baklagiller (Mercimek, Nohut, Fasulye)	İzoflavonlar (Genistein, Daidzein), Fenolik Asitler	Hormonal Denge, Antioksidan	Singh vd., 2017
Yağlı Tohumlar (Ceviz, Badem, Fındık, Ketent Tohumu)	Proantosiyanidinler, Gallik Asit, Ellagik Asit	Antioksidan, Kardiyovasküler Koruma	Zhang vd., 2022
Çay (Yeşil Çay, Siyah Çay)	Kateşinler (EGCG)	Antioksidan, Kardiyovasküler Destek	Jeszka-Skowron vd., 2021
Kahve	Kafeik Asit, Klorojenik Asit	Antioksidan, Metabolik Destek	Jeszka-Skowron vd., 2021
Kakao	Flavanoller (Epikateşin, Kateşin)	Beyin Fonksiyonlarını Destekleyici	Martin ve Ramos, 2017
Baharatlar (Zerdeçal, Tarçın, Karanfil, Kekik)	Kurkumin, Proantosiyanidinler, Fenolik Asitler	Anti-enflamatuvar, Antimikrobiyal	Ali vd., 2021
Fermente Süt Ürünleri (Yoğurt, Kefir, Peynir)	Flavonoidler, Fenolik Asitler	Biyoyararlanım Artışı, Sindirim Destegi	Melini ve Melini, 2021 Wróblewska vd., 2023
Bitkisel Bazlı Süt Alternatifleri (Badem, Soya, Yulaf Sütü)	İzoflavonlar	Hormonal Denge, Kardiyovasküler Destek	Aliakbarian vd., 2015
Fonksiyonel Gıdalar (Meyve Suları, Tahıl Bazlı Ürünler, Süt Ürünleri)	Çeşitli Polifenoller ve Fenolik Asitler	Gıda Stabilitesi, Fonksiyonel Etkiler	Kasote vd., 2021

3.1. Meyve ve Sebzelerdeki Fenolik Bileşikler

Meyve ve sebzeler, fenolik bileşikler açısından en zengin kaynaklardan biridir. Bu bileşiklerin içeriği; bitki türü, genetik faktörler, olgunluk aşaması, yetiştirme koşulları ve işleme yöntemlerine bağlı olarak değişmektedir. Fenolik bileşikler, meyve ve sebzelerde antioksidan, antiinflamatuvar, antimikrobiyal ve kardiyovasküler koruyucu etkiler göstererek insan sağlığına fayda sağlar (Imeh ve Khokhar, 2002; Ignat vd., 2011). Ayrıca, gıda endüstrisinde doğal koruyucu, renk verici ve fonksiyonel bileşenler olarak da kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır.

Meyvelerde bulunan başlıca fenolik bileşikler flavonoidler, fenolik asitler ve stilbenler gibi gruplara ayrılmaktadır (Ignat vd., 2011). Bu bileşikler, meyvelerin rengini, tadını ve besin değerini belirleyen temel faktörlerden biridir. Örneğin (Haminiuk vd., 2012; Macheix, 2018):

- Üzüm, çilek, ahududu ve yaban mersini resveratrol, antosiyaninler ve flavonoidler içerir. Resveratrol, özellikle üzüm kabuklarında ve kırmızı şarapta bulunur ve güçlü antioksidan ve kardiyoprotektif özellikleriyle bilinir.
- Elma ve armut flavonoller (kuersetin, kaempferol), fenolik asitler (kafeik asit, klorojenik asit) açısından zengindir. Kuersetin, hücresel oksidatif stresi azaltarak bağışıklık sistemini destekler.
- Nar gallik asit, ellagik asit ve punikalagin içerir. Bu bileşikler, güçlü antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleriyle bilinir ve bağışıklık sistemini destekleyerek kardiyovasküler hastalık riskini azaltabilir.
- Mango ve kiraz gallik asit ve mangiferin içeriğiyle bilinir ve güçlü antiinflamatuvar ve nöroprotektif etkilere sahiptir.

Sebzelerde bulunan fenolik bileşikler genellikle flavonoidler ve fenolik asitler olarak sınıflandırılır. Bu bileşikler, sebzelerin renklerini, tatlarını ve sağlık üzerindeki etkilerini belirler (Rashmi ve Negi, 2020). Örneğin:

- Brokoli, lahanası ve ıspanak kuersetin, kaempferol ve glukozinolatlar içerir. Bu bileşikler, özellikle kanser önleyici ve antioksidan etkileriyle bilinmektedir.
- Domates ve biber likopen, flavonoller ve kapsaisin içerir. Likopen, güçlü bir karotenoid antioksidan olup, özellikle prostat kanseri ve kalp hastalıklarına karşı koruyucu rol oynar.

- Soğan ve sarımsak flavonoidler (kuersetin, luteolin), kükürt bileşikleri ve organosülfür bileşenleri açısından zengindir. Bu bileşikler, bağışıklık sistemini güçlendirir ve antiinflamatuvar etkiler gösterir.
- Havuç ve tatlı patates karotenoidler ve fenolik asitler açısından zengindir ve özellikle göz sağlığını destekleyici etkileri ile öne çıkar.

Fenolik bileşiklerin içeriği ve etkisi, işleme yöntemleriyle değişebilmektedir. Örneğin, yüksek sıcaklık işlemleri bazı fenolik bileşiklerin bozulmasına neden olurken, fermentasyon gibi işlemler fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını artırabilir (Rashmi ve Negi, 2020). Meyve ve sebzelerde bulunan fenolik bileşikler, gıda endüstrisinde doğal antioksidanlar ve koruyucu bileşenler olarak kullanılmakta ve sağlık açısından önemli faydalar sunmaktadır. Ayrıca, fonksiyonel gıda bileşenleri olarak işlenmiş gıdalara eklenerek raf ömrünü uzatma, besin değerini artırma ve duyuşal özellikleri iyileştirme amacıyla da kullanılmaktadırlar (Macheix, 2018; Rashmi ve Negi, 2020).

3.2. Tahıllar, Baklagiller ve Yağlı Tohumlardaki Fenolik Bileşikler

Fenolik bileşikler, tahıllar, baklagiller ve yağlı tohumlar gibi bitkisel gıdalarda önemli biyolojik işlevlere sahiptir. Bu bileşikler, özellikle kepek tabakasında yoğunlaşmış olup, rafinasyon ve işleme süreçleri sırasında kayıplara uğrayabilir. Fenolik bileşiklerin varlığı, bu gıdaların besin değerini artırırken, sağlık üzerindeki olumlu etkileri sayesinde fonksiyonel gıda olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir (Xu vd., 2020).

Tam tahıllar, içerdiği fenolik asitler sayesinde önemli bir antioksidan kaynağıdır. Buğday, çavdar, arpa ve yulaf gibi tahıllarda ferulik asit ve p-kumarik asit gibi bileşikler bulunur. Ferulik asit, özellikle buğday kepeğinde yüksek miktarda bulunur ve oksidatif strese karşı koruyucu etki gösterir. Tahıllardaki fenolik bileşikler, serbest radikalleri nötralize ederek hücresel hasarı önleyebilir ve kronik hastalıkların riskini azaltabilir. Bununla birlikte, tam tahılların işlenmesi sırasında meydana gelen rafinasyon işlemi, fenolik bileşik içeriğini azaltarak biyoaktivitesini düşürür (Van Hung, 2016).

Baklagiller, fenolik asitler ve izoflavonlar açısından zengin bitkisel protein kaynaklarıdır. Mercimek, nohut ve fasulye gibi baklagiller, antioksidan özellikleri ile ön plana çıkar. Soya fasulyesi, genistein ve daidzein gibi izoflavonlar içerir ve bu bileşikler hormonal denge üzerinde östrojen benzeri etkiler göstermektedir. İzoflavonlar, menopoz semptomlarını hafifletmekte, kemik sağlığını desteklemekte ve kardiyovasküler hastalık riskini azaltabilmektedir. Bunun yanında, baklagillerin pişirme ve fermentasyon süreçleri, fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını etkiler (Singh vd., 2017).

Yağlı tohumlar, yüksek miktarda fenolik bileşik içeren bir diğer önemli gıda grubudur. Ceviz, badem, fındık ve keten tohumu, proantosiyanidinler, gallik asit ve ellagik asit gibi bileşenler bakımından zengindir. Bu bileşiklerin antioksidan etkileriyle hücrel yaşlanmayı yavaşlatma, inflamasyonu azaltma ve nörodejeneratif hastalıklara karşı koruma gibi özellikleri vardır. Yağlı tohumların düzenli tüketimi, kalp-damar sağlığını destekleyerek kan basıncını düzenlemeye ve kötü kolesterol seviyelerini düşürmeye yardımcı olmaktadır (Zhang vd., 2022).

3.3. Çay, Kahve, Kakao ve Baharatlardaki Fenolik Bileşikler

Fenolik bileşikler açısından zengin olan bitkisel içecekler ve baharatlar, günlük beslenmenin önemli bir parçasını oluşturarak sağlık açısından çeşitli faydalar sağlar. Bu bileşikler, antioksidan, antiinflamatuvar ve antimikrobiyal özellikleri sayesinde bağışıklık sistemini destekler, kronik hastalıklara karşı koruma sağlar ve metabolik süreçleri düzenler.

Çay, polifenoller açısından en zengin içeceklerden biridir. Yeşil çay ve siyah çay, kateşinler, özellikle epigallokateşin gallat (EGCG) bakımından zengin olup, güçlü antioksidan özelliklere sahiptir. Bu bileşikler, hücrel oksidatif stresi azaltarak kardiyovasküler sağlığı destekleyebilir, kan basıncını düzenleyebilir ve bazı kanser türlerine karşı koruyucu etkiler gösterebilir. Fermente edilmemiş yeşil çay, siyah çaya kıyasla daha yüksek oranda kateşin içerirken, siyah çayda teaflavinler gibi farklı polifenolik bileşikler bulunur (Jeszka-Skowron vd., 2021).

Kahve, fenolik bileşikler açısından zengin bir içecek olup, özellikle kafeik asit ve klorojenik asit içerir. Klorojenik asit, kan şekeri seviyelerinin düzenlenmesinde ve yağ metabolizmasının desteklenmesinde önemli bir rol oynar. Bu nedenle, kahve tüketiminin tip 2 diyabet ve obeziteyle mücadelede olumlu etkiler sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, kahvede bulunan fenolik bileşikler sinir sistemini koruyarak nörodejeneratif hastalıkların önlenmesine yardımcı olabilir. Ancak, yüksek sıcaklıkta kavurma işlemi sırasında bazı fenolik bileşiklerin miktarı azalmaktadır (Jeszka-Skowron vd., 2021).

Kakao, flavanoller açısından oldukça zengin bir kaynaktır. Epikateşin ve kateşin gibi flavanoller içeren kakao, beyin fonksiyonlarını destekleyici etkileri ile bilinmektedir. Kakao tüketiminin hafıza ve bilişsel işlevler üzerinde olumlu etkiler gösterdiği araştırmalarla ortaya konmuştur. Ayrıca, kakao polifenolleri damar sağlığını destekleyerek kan dolaşımını iyileştirir ve kardiyovasküler hastalık riskini azaltabilir. Bitter çikolata, yüksek flavanol içeriği sayesinde bu

sağlık yararlarını sağlayabilirken, işlenmiş sütlü çikolatalarda fenolik bileşik oranı daha düşük olmaktadır (Martin ve Ramos, 2017).

Baharatlar, içerdiği fenolik bileşikler sayesinde antioksidan ve antimikrobiyal özellikleriyle öne çıkar. Zerdeçal, kurkumin bileşiği içerir ve güçlü antiinflatuvar etkileri ile bağışıklık sistemini destekler. Kurkuminin, inflamasyonu azaltıcı etkileri nedeniyle artrit ve bazı kronik hastalıkların tedavisinde destekleyici rol oynayabileceği öne sürülmektedir. Tarçın, proantosiyanidinler ve fenolik asitler bakımından zengindir ve kan şekeri seviyelerini dengelemeye yardımcı olur. Karanfil ve kekik gibi baharatlar, yüksek fenolik bileşik içeriğine sahiptir ve güçlü antimikrobiyal özellikleri ile bilinir. Bu bileşikler, doğal koruyucu olarak gıda endüstrisinde kullanılmakta ve gıdaların raf ömrünü uzatmada etkili olmaktadır (Ali vd., 2021).

Bitkisel içecekler ve baharatlardaki fenolik bileşikler, yalnızca sağlık yararları sağlamakla kalmaz, aynı zamanda gıda endüstrisinde doğal bileşenler olarak fonksiyonel gıda üretiminde de yaygın olarak kullanılır. Bu bileşikler, gıdaların besin değerini artırmak, renk ve tat stabilitesini sağlamak ve doğal koruyucu olarak kullanmak amacıyla farklı gıda formülasyonlarına eklenmektedir (do Carmo Brito vd., 2017).

3.4. Süt ve Fermente Ürünlerde Fenolik Bileşiklerin Varlığı ve Etkileri

Süt ve süt ürünleri doğrudan fenolik bileşik kaynağı olmasa da fermente ve fonksiyonel süt ürünleri aracılığıyla fenolik bileşikler içermektedir. Fenolik bileşikler, bu ürünlerin besin değerini artırarak sağlık üzerinde olumlu etkiler gösterir. Özellikle antioksidan kapasiteleri sayesinde, oksidatif stresin azaltılmasına katkıda bulunurlar (Melini ve Melini, 2021).

Fermente süt ürünleri, fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını artıran önemli bir kategori olarak öne çıkar. Yoğurt, kefir ve peynir gibi fermente gıdalar, içeriklerindeki mikroorganizmalar sayesinde fenolik bileşiklerin sindirilebilirliğini artırmaktadır. Fermentasyon süreci, bazı flavonoidlerin yapısal dönüşümünü sağlayarak bağırsak mikrobiyotası ile daha etkili bir etkileşim kurmalarına yardımcı olur. Bunun sonucunda, vücutta antiinflatuvar ve kardiyovasküler koruyucu etkiler gösterirler (Wróblewska vd., 2023).

Bitkisel bazlı süt alternatifleri de fenolik bileşik içeriği açısından önemli bir kaynaktır. Badem sütü, soya sütü ve yulaf sütü gibi bitkisel bazlı içecekler, doğal olarak polifenoller içerir. Özellikle soya sütü, izoflavon bakımından zengin olup, östrojen benzeri etkileriyle hormonal denge üzerinde düzenleyici bir rol oynar. Son yıllarda, polifenol ile zenginleştirilmiş süt ürünleri de

dikkat çekmektedir. Antioksidan özellikleri nedeniyle, süt ürünleri fenolik bileşiklerle zenginleştirilerek fonksiyonel gıdalara dönüştürülebilir. Örneğin, yeşil çay polifenollerini veya üzüm çekirdeği ekstraktı ile zenginleştirilmiş yoğurtlar, oksidatif stresin azaltılmasına katkıda bulunmakta ve bağışıklık sistemini desteklemektedir (Aliakbarian vd., 2015).

Fenolik bileşiklerin süt proteinleri ile etkileşimleri, doku ve kıvamı değiştirmekte ve biyoyararlanımını artırabilmektedir. Ancak, fenolik bileşiklerin süt ürünlerindeki stabilitesi, üretim sürecinde kullanılan sıcaklık, pH ve depolama koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Yüksek sıcaklıklarda bazı fenolik bileşiklerin bozulma riski artarken, düşük pH seviyeleri stabiliteyi korur. Bu nedenle, fonksiyonel süt ürünleri üretiminde optimum koşulların belirlenmesi, fenolik bileşiklerin etkinliğini artırmak için kritik bir faktördür.

4. Gıda İşleme Tekniklerinin Fenolik Bileşik Stabilitesi Üzerine Etkileri

Gıda işleme süreçleri, fenolik bileşiklerin stabilitesini ve biyoyararlanımını önemli ölçüde etkilemektedir (Rashmi ve Negi, 2020). Isıl işlemler, pH değişimleri, oksijen ve ışığa maruz kalma gibi faktörler, bu bileşiklerin oksidasyonuna, bozunmasına veya fonksiyonel özelliklerinde kayıplara yol açabilir (Mark vd., 2019).

4.1. Isıl İşlemler ve Alternatif Yöntemler

Yüksek sıcaklık uygulamaları, bazı fenolik bileşiklerin parçalanmasına neden olmaktadır. Buharla pişirme ve haşlama gibi yöntemler fenolik kayıplarını azaltırken, kızartma gibi işlemler oksidatif bozulmayı artırır (Cao vd., 2021). Alternatif olarak, ohmik ısıtma ve mikrodalga işlemleri kısa sürede ısıtma sağlayarak fenolik bileşiklerin stabilitesini daha iyi koruyabilmektedir. Yüksek basınçlı işleme (HPP) gibi yöntemler ise, özellikle ısıya duyarlı fenolik bileşiklerin korunmasında etkili olmaktadır (Cao vd., 2021).

4.2. Fermantasyonun Fenolik Bileşiklere Etkisi

Fermantasyon, probiyotik mikroorganizmalar sayesinde fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını artırabilir. Bu süreçte bazı flavonoidlerin daha kolay sindirilebilir türevlerine dönüşmesi sağlanarak bağırsak emilimi iyileştirir. Örneğin, yoğurt ve kefir gibi fermente süt ürünlerinde fenolik bileşiklerin antioksidan kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir (Melini ve Melini, 2021). Kakao çekirdeklerindeki fenolik bileşikler de fermantasyondan etkilenir. Fakat, fermantasyonun başında toplam fenolik bileşiklerin seviyeleri en yüksekken, süreç ilerledikçe bu seviyeler önemli ölçüde azalır ve bu

azalma, antioksidan kapasitedeki düşüşle ilişkilendirilmektedir (do Carmo Brito vd., 2017).

4.3. Mikroenkapsülasyon ve Koruma Yöntemleri

Mikroenkapsülasyon, fenolik bileşiklerin stabilitesini artırmak ve oksidatif bozulmalarını önlemek için kullanılan bir yöntemdir. Sprey kurutma, fenolik bileşikler ince toz halinde kapsüle ederek gıda formülasyonlarına entegre edilmesini sağlar. Nanoenkapsülasyon gibi ileri teknikler ise, fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını artırarak bağırsakta daha etkin bir emilim sağlar (Neuenfeldt vd., 2022).

4.4. İnovatif Stratejiler ve Fonksiyonel Gıdalara Entegrasyon

Fenolik bileşiklerin fonksiyonel etkilerini artırmak için proteinlerle kompleks oluşturma, prebiyotik özelliklerini güçlendirme ve lipit bazlı taşıyıcı sistemlerle emilimini artırma gibi stratejiler uygulanmaktadır. Bu yöntemler, fenolik bileşiklerin gıda ürünlerinde daha stabil ve biyoyararlı hale gelmesini sağlayarak sağlık üzerindeki olumlu etkilerini artırabilir (Kasote vd., 2021). Sonuç olarak, fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıdalardaki etkinliğini koruyabilmek için uygun işleme tekniklerinin seçilmesi ve stabiliteyi artırıcı yöntemlerin uygulanması gerekmektedir.

5. Gelecek Perspektifler ve Araştırma Yönelimleri

Fenolik bileşikler, gıda ve sağlık alanında büyük ilgi gören biyoaktif bileşiklerdir. Fonksiyonel gıdalardaki kullanımları giderek artarken, biyoyararlanımlarını ve sağlık üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, tüketici farkındalığını artırmak ve düzenleyici çerçeveler oluşturmak, bu bileşiklerin daha yaygın ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

5.1. Yeni Kaynakların Keşfi ve Biyoyararlanımı Artırma Yöntemleri

Fenolik bileşiklerin biyoyararlanımı ve etkinliği, kaynaklarına ve işleme koşullarına bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, yeni fenolik bileşik kaynaklarının keşfi ve bu bileşiklerin biyoyararlanımını artırma stratejileri, bilim dünyasında öncelikli araştırma alanları arasındadır. Geleneksel bitkisel kaynakların dışında, deniz yosunları, mikroalgler, mantarlar ve fermente gıdalar gibi alternatif kaynaklardan fenolik bileşikler elde edilmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir (Hayes ve García-Vaquero, 2016; Subbiah vd., 2023). Bu alternatif kaynaklar, fenolik bileşiklerin çeşitliliğini artırarak, gıda ve sağlık alanında daha geniş kullanım imkânı sunabilir. Bunun yanı sıra, tarımsal atıklar gibi yan ürünlerden fenolik bileşiklerin geri kazanımı,

sürdürülebilir üretim açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Üzüm çekirdeği, kahve posası ve nar kabuğu gibi atıklar, biyoyararlı fenolik bileşikler açısından zengin olup, geri dönüştürülerek fonksiyonel gıdalara ve sağlık ürünlerine entegre edilebilir (Mir-Cerdà vd., 2023).

Fenolik bileşiklerin insan vücudunda daha iyi emilmesi ve metabolize edilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Nanoteknoloji tabanlı taşıyıcı sistemler, özellikle nanoenkapsülasyon ve lipit bazlı taşıyıcılar, fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını artırmada önemli bir rol oynar (Roshanpour vd., 2021). Bu yöntemler, fenolik bileşiklerin bağırsakta daha uzun süre aktif kalmasını ve vücut tarafından daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Fermantasyon da fenolik bileşiklerin biyoyararlanımını artıran bir diğer yöntemdir. Fermente gıdalarda bulunan probiyotik bakteriler, fenolik bileşiklerin sindirilebilirliğini artırarak bağırsaktaki emilimlerini kolaylaştırabilir. Örneğin, fermente süt ürünleri ve bitkisel bazlı içecekler, fenolik bileşiklerin fonksiyonel etkilerini güçlendiren bileşenler içermektedir (Wróblewska vd., 2023). Ayrıca, gıdalara biyoyararlanımı artıran sinerjistik bileşiklerin (C vitamini, lipitler vb.) eklenmesi, fenolik bileşiklerin etkinliğini yükseltir. C vitamini, fenolik bileşiklerin oksidatif stabilitesini artırırken, lipit bazlı taşıyıcılar yağda çözünen fenolik bileşiklerin emilimini desteklemektedir (Chen vd., 2022).

5.2. Klinik Çalışmalar ve Sağlık Üzerindeki Etkilerin Doğrulanması

Fenolik bileşiklerin antioksidan, antiinflamatuvar, kardiyovasküler, nöroprotektif ve kanser önleyici etkileri laboratuvar ve hayvan çalışmalarında kanıtlanmış olsa da bu etkilerin insanlarda doğrulanması için daha fazla klinik çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Fenolik bileşiklerin insan metabolizmasındaki yollarının daha iyi anlaşılması, optimal doz belirlenerek uzun vadeli güvenliğinin test edilmesi ve diyetle alınan fenolik bileşiklerin bireysel genetik farklılıklar göz önüne alınarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yeşil çay polifenoller, resveratrol ve kurkumin gibi bileşikler üzerine yapılan klinik çalışmalar umut verici sonuçlar sunsa da geniş ölçekli ve uzun süreli araştırmalar henüz yetersizdir. Metabolik hastalıklar, nörodejeneratif hastalıklar ve bağırsak sağlığı üzerine yapılan çalışmaların detaylandırılması, fenolik bileşiklerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini daha net ortaya koyacaktır. Bu nedenle, fonksiyonel gıdalarda kullanılan fenolik bileşiklerin etkilerini belirlemek amacıyla disiplinler arası klinik çalışmaların artırılması gerekmektedir.

5.3. Fonksiyonel Gıdalardaki Fenolik Bileşikler İçin Yasal Düzenlemeler

Fenolik bileşiklerin gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılması için düzenleyici kurumlar tarafından onaylanması gerekmektedir. Ancak şu anda, farklı ülkelerde fenolik bileşiklerin gıdalarda kullanımı ile ilgili farklı düzenlemeler bulunmaktadır. ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), belirli fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıdalarda kullanımına sınırlamalar getirirken, Japonya ve Güney Kore gibi ülkeler polifenol içeriği yüksek fonksiyonel gıdaların tüketimini teşvik etmektedir (Albuquerque vd., 2021). Bu bağlamda, fenolik bileşiklerin güvenli tüketim dozlarının belirlenmesi, toksisite testleri ve uzun vadeli etkilerinin araştırılması gibi süreçlerin tamamlanması gerekmektedir. Ayrıca, fonksiyonel gıdalar için uluslararası bir standart oluşturularak tüketici güvenliği artırılmalı ve fenolik bileşik içeren gıdaların piyasaya sunulması daha kolay hale getirilmelidir.

5.4. Tüketici Farkındalığı ve Piyasa Taleplerine Uyum Sağlama

Fonksiyonel gıdaların başarısı, tüketici farkındalığı ve kabulü ile doğrudan ilişkilidir (Topolska vd., 2021). Fenolik bileşiklerin sağlık üzerindeki faydalarının bilimsel olarak kanıtlanması ve tüketicilere doğru bir şekilde sunulması, bu bileşiklerin daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlayacaktır. Günümüzde doğal ve temiz etiketli gıdalar giderek daha fazla talep görmekte, özellikle bitkisel bazlı fonksiyonel gıdalar vegan ve sağlıklı yaşam tarzını benimseyen tüketiciler tarafından tercih edilmektedir. Fenolik bileşik içeriği yüksek gıdalar, özellikle antioksidan içecekler ve polifenol bakımından zengin fonksiyonel çikolatalar gibi ürünler, piyasa trendlerinde öne çıkmaktadır. Ayrıca, akıllı ambalajlama ve artırılmış gerçeklik teknolojileri, tüketicilere gıda içeriği hakkında daha fazla bilgi sunarak farkındalık yaratabilir. Tüketicilerin bilinçlenmesi ve piyasa trendlerinin izlenmesi, fenolik bileşik içeren fonksiyonel gıdaların daha geniş kitlelere ulaşmasını sağlayacaktır.

5.5. Gelecekteki Araştırmalar ve Uygulamalar İçin Öneriler

Fenolik bileşikler, fonksiyonel gıda formülasyonlarında sağlık faydaları ve doğal koruyucu özellikleri nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Antioksidan, antiinflamatuvar ve metabolizma düzenleyici etkileri sayesinde, bu bileşikler kronik hastalıkların önlenmesine katkı sağlamakta ve bağırsak mikrobiyotası ile etkileşime girerek prebiyotik özellikler gösterebilmektedir. Ancak biyoyararlanımının artırılması, sağlık etkilerinin klinik çalışmalarla doğrulanması ve düzenleyici süreçlerin netleştirilmesi gibi zorlukların aşılması gerekmektedir. Fenolik bileşiklerin gıda endüstrisinde daha geniş

kullanım alanı bulabilmesi için biyoteknolojik inovasyonların yanı sıra tüketici farkındalığının artırılması da büyük önem taşımaktadır.

Gelecekte yapılacak araştırmaların, sürdürülebilir üretim kaynakları, biyoyararlanımı artıran teknolojiler ve geniş ölçekli klinik çalışmalar üzerine yoğunlaşması gerekmektedir. Tarımsal yan ürünlerden fenolik bileşiklerin geri kazanımı, mikroalgler ve fermente gıdalar gibi alternatif kaynakların araştırılması, gıda sektöründe bu bileşiklerin etkin kullanımını sağlayacaktır. Ayrıca, nanoteknoloji ve mikroenkapsülasyon gibi ileri işleme teknikleriyle fenolik bileşiklerin stabilitesi ve biyoyararlanımı artırılabilir. Klinik çalışmaların yaygınlaştırılması ve farklı fenolik bileşik kombinasyonlarının sinerjik etkilerinin araştırılması, bu bileşiklerin fonksiyonel gıdalardaki rolünü daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır. Bu kapsamda geliştirilecek stratejiler, fenolik bileşiklerin fonksiyonel gıda endüstrisinde daha etkili ve güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlayarak sağlıklı beslenme trendlerine yön verecektir.

Kaynakça

- Albuquerque, B. R., Heleno, S. A., Oliveira, M. B. P., Barros, L., ve Ferreira, I. C. (2021). Phenolic compounds: Current industrial applications, limitations and future challenges. *Food ve function*, 12(1), 14-29.
- Ali, A., Wu, H., Ponnampalam, E. N., Cottrell, J. J., Dunshea, F. R., ve Suleria, H. A. (2021). Comprehensive profiling of most widely used spices for their phenolic compounds through LC-ESI-QTOF-MS2 and their antioxidant potential. *Antioxidants*, 10(5), 721.
- Aliakbarian, B., Casale, M., Paini, M., Casazza, A. A., Lanteri, S., ve Perego, P. (2015). Production of a novel fermented milk fortified with natural antioxidants and its analysis by NIR spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 376-383.
- Beara, I. N., Lesjak, M. M., Orcic, D. Z., Simin, N. D., Cetoyevic-Simin, D. D., Bozin, B., vd. (2012). Comparative analysis of phenolic profile, antioxidant, anti-inflammatory, and cytotoxic activity of two closely related Plantain species: *Plantago altissima* L. and *Plantago lanceolata* L. *LWT — Food Science and Technology*, 47, 64–70.
- Caleja, C., Ribeiro, A., Filomena Barreiro, M., ve CFR Ferreira, I. (2017). Phenolic compounds as nutraceuticals or functional food ingredients. *Current pharmaceutical design*, 23(19), 2787-2806.
- Cao, H., Saroglu, O., Karadag, A., Diaconeasa, Z., Zoccatelli, G., Conte-Junior, C. A., Gonzalez-Aguilar, G. A., Ou, J., Bai, W., Zamarioli, C. M., de Freitas, L. A. P., Shpigelman, A., Campelo, P. H., Capanoglu, E., Hii, C. L., Jafari, S. M., Qi, Y., Liao, P., Wang, M., Zou, L., Bourke, P., Simal-Gandara, J. ve Xiao, J. (2021). Available technologies on improving the stability of polyphenols in food processing. *Food Frontiers*, 2(2), 109-139.
- Chen, X., Li, H., Zhang, B., ve Deng, Z. (2022). The synergistic and antagonistic antioxidant interactions of dietary phytochemical combinations. Critical reviews in food science and nutrition, 62(20), 5658-5677.
- do Carmo Brito, B. D. N., Chisté, R. C., da Silva Pena, R., Gloria, M. B. A., ve Lopes, A. S. (2017). Bioactive amines and phenolic compounds in cocoa beans are affected by fermentation. *Food Chemistry*, 228, 484-490.
- Durazzo, A., Lucarini, M., Souto, E. B., Cicala, C., Caiazzo, E., Izzo, A. A., Novellino, E. ve Santini, A. (2019). Polyphenols: A concise overview on the chemistry, occurrence, and human health. *Phytotherapy Research*, 33(9), 2221-2243.
- Graf, B. A., Milbury, P. E., ve Blumberg, J. B. (2005). Flavonols, flavones, flavanones, and human health: Epidemiological evidence. *Journal of Medicinal Food*, 8(3), 281–290.

- Günel-Köroğlu, D., Yılmaz, H., Turan, S., ve Capanoglu, E. (2022). Exploring the lentil protein and onion skin phenolics interaction by fluorescence quenching method. *Food Bioscience*, 50, 102000.
- Haminiuk, C. W., Maciel, G. M., Plata-Oviedo, M. S., ve Peralta, R. M. (2012). Phenolic compounds in fruits—an overview. *International journal of food science and technology*, 47(10), 2023-2044.
- Harnly, J. M., Bhagwat, S., ve Lin, L. Z. (2007). Profiling methods for the determination of phenolic compounds in foods and dietary supplements. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 389, 47–61.
- Hayes, M., ve García-Vaquero, M. (2016). Bioactive compounds from fermented food products. *Novel Food Fermentation Technologies*, 293-310.
- Heleno, S. A., Martins, A., Queiroz, M. J. R., ve Ferreira, I. C. (2015). Bioactivity of phenolic acids: Metabolites versus parent compounds: A review. *Food chemistry*, 173, 501-513.
- Ignat, I., Volf, I., ve Popa, V. I. (2011). A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food chemistry*, 126(4), 1821-1835.
- Imeh, U., ve Khokhar, S. (2002). Distribution of conjugated and free phenols in fruits: antioxidant activity and cultivar variations. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(22), 6301-6306.
- Jeszka-Skowron, M., Zgoła-Grześkowiak, A., ve Grześkowiak, T. (2021). Phenolic compounds in coffee and tea beverages. *Analytical methods in the determination of bioactive compounds and elements in food*, 31-81.
- Kanakis, C. D., Hasni, I., Bourassa, P., Hamdani, S., Tarantilis, P. A., ve Tajmir-Riahi, H. A. (2011). Milk β -lactoglobulin complexes with tea polyphenols. *Food Chemistry*, 127, 1046–1055.
- Kasote, D., Tiozon Jr, R. N., Sartagoda, K. J. D., Itagi, H., Roy, P., Kohli, A., Regina, A. ve Sreenivasulu, N. (2021). Food processing technologies to develop functional foods with enriched bioactive phenolic compounds in cereals. *Frontiers in Plant Science*, 12, 771276.
- Lv, Q. Z., Long, J. T., Gong, Z. F., Nong, K. Y., Liang, X. M., Qin, T., Huang, W. ve Yang, L. (2021). Current state of knowledge on the antioxidant effects and mechanisms of action of polyphenolic compounds. *Natural Product Communications*, 16(7), 1934578X211027745.
- Ma, F., Lin, Y., Ni, Z., Chen, T., ve Wang, X. (2023). Therapeutic effects of natural polyphenols on colorectal adenomas: Focus on preclinical studies. *Oncology Reports*, 49(6), 1-22.
- Macheix, J. J. (2018). *Fruit phenolics*. CRC press.
- Mark, R., Lyu, X., Lee, J. J., Parra-Saldívar, R., ve Chen, W. N. (2019). Sustainable production of natural phenolics for functional food applications. *Journal of Functional Foods*, 57, 233-254.

- Martín, M. Á., ve Ramos, S. (2017). Health beneficial effects of cocoa phenolic compounds: A mini-review. *Current Opinion in Food Science*, 14, 20-25.
- Melini, E., ve Melini, V. (2021). Impact of fermentation on phenolic compounds and antioxidant capacity of quinoa. *Fermentation*, 7(1), 20.
- Mir-Cerdà, A., Nunez, O., Granados, M., Sentellas, S., ve Saurina, J. (2023). An overview of the extraction and characterization of bioactive phenolic compounds from agri-food waste within the framework of circular bioeconomy. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 161, 116994.
- Neuenfeldt, N. H., de Moraes, D. P., de Deus, C., Barcia, M. T., ve de Menezes, C. R. (2022). Blueberry phenolic composition and improved stability by microencapsulation. *Food and Bioprocess Technology*, 15(4), 750-767.
- Oluwole, O., Fernando, W. B., Lumanlan, J., Ademuyiwa, O., ve Jayasena, V. (2022). Role of phenolic acid, tannins, stilbenes, lignans and flavonoids in human health—a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(10), 6326-6335.
- Ozdal, T., Capanoglu, E., ve Altay, F. (2013). A review on protein–phenolic interactions and associated changes. *Food Research International*, 53(2), 957-970.
- Rashmi, H. B., ve Negi, P. S. (2020). Phenolic acids from vegetables: A review on processing stability and health benefits. *Food Research International*, 136, 109298.
- Rawel, H. A., Meidtner, K., ve Kroll, J. (2005). Binding of selected phenolic compounds to proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 4228–4235.
- Rawel, H. M., Czajka, D., Rohn, S., ve Kroll, J. (2002). Interactions of different phenolic acids and flavonoids with soy proteins. *European Food Research and Technology*, 214(1), 40-47.
- Roshanpour, S., Tavakoli, J., Beigmohammadi, F., ve Alaei, S. (2021). Improving antioxidant effect of phenolic extract of *Mentha piperita* using nanoencapsulation process. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 23-32.
- Saricaoglu, B., Yilmaz, H., Subaşı, B. G., ve Capanoglu, E. (2023). Effect of de-phenolization on protein-phenolic interactions of sunflower protein isolate. *Food Research International*, 164, 112345.
- Scalbert, A., ve Williamson, G. (2000). Dietary intake and bioavailability of polyphenols. *Journal of Nutrition*, 130, 2073–2085.
- Silva, J. C., Rodrigues, S., Feas, X., ve Estevinho, L. M. (2012). Antimicrobial activity, phenolic profile, and role in the inflammation of propolis. *Food and Chemical Toxicology*, 50, 1790–1795.

- Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., ve Singh, N. (2017). Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: A review. *Food Research International*, 101, 1-16.
- Smith, A. W. (2012). Lipid-protein interactions in biological membranes: A dynamic perspective. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1818, 172-177.
- Subbiah, V., Xie, C., Dunshea, F. R., Barrow, C. J., ve Suleria, H. A. (2023). The quest for phenolic compounds from seaweed: Nutrition, biological activities and applications. *Food Reviews International*, 39(8), 5786-5813.
- Topolska, K., Florkiewicz, A., ve Filipiak-Florkiewicz, A. (2021). Functional food—Consumer motivations and expectations. *International journal of environmental research and public health*, 18(10), 5327.
- Van Hung, P. (2016). Phenolic compounds of cereals and their antioxidant capacity. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(1), 25-35.
- Wróblewska, B., Kuliga, A., ve Wnorowska, K. (2023). Bioactive dairy-fermented products and phenolic compounds: Together or apart. *Molecules*, 28(24), 8081.
- Xu, M., Rao, J., ve Chen, B. (2020). Phenolic compounds in germinated cereal and pulse seeds: Classification, transformation, and metabolic process. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(5), 740-759.
- Zhang, H., Tsao, R., ve Yang, R. (2020). Interactions between phenolic compounds and food macronutrients: Characterization, influence on digestion and health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(4), 653-675.
- Zhang, Q., Cheng, Z., Wang, Y., ve Fu, L. (2021). Dietary protein-phenolic interactions: Characterization, biochemical-physiological consequences, and potential food applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(21), 3589-3615.
- Zhang, Y., Xiao, H., Lv, X., Wang, D., Chen, H., ve Wei, F. (2022). Comprehensive review of composition distribution and advances in profiling of phenolic compounds in oilseeds. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1044871.
- Zimmer, A. R., Leonardi, B., Miron, D., Schapoval, E., Oliveira, J. R., ve Gosmann, G. (2012). Antioxidant and anti-inflammatory properties of *Cap-sicum baccatum*: From traditional use to scientific approach. *Journal of Ethnopharmacology*, 139, 228-233.

Fonksiyonel Gıdalarda Akıllı Sistemler 8

Recep Taş¹

Özet

Beslenme bilimi, günümüzde popülasyon tabanlı genel diyet önerilerinden uzaklaşarak, bireylerin genetik yapısı, metabolik özellikleri ve yaşam tarzı verilerini temel alan “kişiselleştirilmiş beslenme” paradigmasına doğru evrimleşmektedir. Bu kitap bölümü, fonksiyonel gıdaların akıllı teknolojilerle entegrasyonunu ele alarak, bu yeni yaklaşımın halk sağlığı ve bireysel sağlık yönetimindeki dönüştürücü etkisini incelemektedir. Çalışmada, üretimden tüketime kadar olan süreçte Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zekâ (AI) ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerin gıda sistemlerine nasıl entegre edildiği detaylandırılmaktadır. Fonksiyonel bileşenlerin biyoyararlanımını ve stabilitesini artıran nanoemülsiyonlar ve lipozomlar gibi nanoteknolojik taşıyıcı sistemlerin, hedefe yönelik besin salımlarındaki kritik rolüne odaklanılmaktadır. Buna paralel olarak, biyosensörler ve giyilebilir teknolojiler aracılığıyla elde edilen gerçek zamanlı fizyolojik verilerin, yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek kişiye özgü dinamik beslenme planlarına dönüştürülmesi süreci analiz edilmektedir. Ayrıca akıllı ambalaj sistemleri, 3D gıda baskısı ve mobil sağlık uygulamalarının tüketici deneyimini nasıl iyileştirdiği tartışılmaktadır. Son olarak çalışma, kişisel verilerin gizliliği, etik kaygılar ve yasal düzenlemelerdeki eksiklikler gibi zorluklara dikkat çekerken; fonksiyonel gıdalar ve akıllı sistemlerin sinerjisinin, kronik hastalıkların önlenmesinde ve sürdürülebilir toplum sağlığının inşasında proaktif bir çözüm sunduğu sonucuna varmaktadır.

1. Kişiselleştirilmiş Beslenmenin Yükselişi

Beslenme bilimi uzun yıllar boyunca genellenmiş öneriler ve popülasyon düzeyinde standart diyet rehberleri üzerine kurulmuştur. Ancak son dönemde, bilimsel veriler ve değişen tüketici beklentileri, “herkese uyan tek tip diyet” yaklaşımının yetersiz kaldığını ortaya koymakta ve

1 Doç. Dr., Bartın Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Bartın, Türkiye, rtas@bartin.edu.tr, 0000-0002-3743-7770

beslenmenin bireysel farklılıklar göz önüne alınarak düzenlenmesi gereğini vurgulamaktadır (Adams vd., 2020; Ordovas vd., 2018). Kişiselleştirilmiş beslenme kavramı, her bireyin genetik yapısı, yaşam tarzı ve metabolik özelliklerindeki varyasyonlar nedeniyle aynı beslenme programlarına farklı yanıtlar verebileceği gerçeğine dayanmaktadır. Nitekim, son yıllarda yapılan çalışmalar benzer diyet uygulamalarına karşı bireyler arasında belirgin metabolik yanıt farklılıkları olabildiğini göstermiştir (Berry vd., 2020; Zeevi vd., 2015). Bu bulgular ışığında, kişiye özgü hazırlanmış beslenme planlarının, tek tip önerilere kıyasla sağlık sonuçlarını iyileştirmede daha etkili olabileceği düşünülmektedir (Celis-Morales vd., 2017; Roman vd., 2024). Özellikle obezite ve diyabet gibi beslenme ile ilişkili kronik hastalıkların önlenmesi ve yönetiminde kişiselleştirilmiş beslenmenin önemli faydalar sağlayabileceği ileri sürülmektedir (Lam vd., 2025; Ordovas vd., 2018).

Kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımı, nutrigenetik ve nutrigenomik bulgular başta olmak üzere bireyin kendine özgü biyolojik ve davranışsal özelliklerinin beslenme planlamasına entegre edilmesini içerir (Adams vd., 2020; Ordovas vd., 2018). Nutrigenetik, genetik polimorfizmlerin (ör. belirli bir gen varyantının) besin öğelerine verilen metabolik tepkileri nasıl etkilediğini incelerken; nutrigenomik, besin öğelerinin ve besin kaynaklı biyoaktif bileşenlerin gen ekspresyonu üzerindeki etkilerini araştırır (Roman vd., 2024). Buna ek olarak, beslenmeye bağlı epigenetik değişimler (nutri-epigenetik) ve bireyin bağırsak mikrobiyota profili (nutri-metagenomik) gibi faktörler de giderek artan bir şekilde kişiselleştirilmiş beslenme planlarına dahil edilmektedir (Lam vd., 2025; Ordovas vd., 2018). Bireyin yaşam tarzına ilişkin veriler (örn. fiziksel aktivite düzeyi, uyku düzeni, stres yönetimi) ve klinik fenotip özellikleri (örn. vücut kitle indeksi, kan biyokimyası, metabolik belirteçler) de bu kapsamda değerlendirilerek, beslenme önerilerinin mümkün olan en yüksek hassasiyetle bireye uygun hale getirilmesi hedeflenir (Adams vd., 2020). Son yıllardaki teknolojik gelişmeler ve çoklu “-omik” veri analiz yöntemlerinin yaygınlaşması da genetik testler, kan biyobelirteç ölçümleri ve dijital sağlık uygulamalarından elde edilen büyük verilerin beslenme planlarına dahil edilmesini kolaylaştırmıştır (Adams vd., 2020). Bu sayede bireylerin genetik yatkınlıkları ve mevcut metabolik durumlarıyla uyumlu, kişiye özel beslenme önerileri geliştirmek mümkün hale gelmektedir.

Fonksiyonel gıdalar kavramı, kişiselleştirilmiş beslenme alanında önemli bir bağlam oluşturmaktadır. Fonksiyonel gıdalar, temel besleyici değerlerinin ötesinde, içerdiği biyolojik olarak aktif bileşenler aracılığıyla sağlık üzerinde faydalı etkiler gösteren ve hastalık riskini azaltmaya katkı sağlayan gıdalar olarak tanımlanır (Lam vd., 2025). Örneğin, posa (diyet lifi) yönünden zengin gıdaların tokluk hissini artırarak glisemik kontrolü iyileştirdiği,

polifenol içeriği yüksek meyve-sebzelerin antioksidan ve anti-inflamatuvar etkileriyle kronik hastalık riskini azalttığı, omega-3 yağ asitleri içeren besinlerin kan lipid profilini iyileştirip kardiyovasküler risk etmenlerini düşürebildiği bilimsel çalışmalarla gösterilmiştir (Lam vd., 2025). Benzer şekilde, probiyotik veya prebiyotik özellikteki fonksiyonel gıdaların bağırsak mikrobiyotasını dengeleyerek metabolik ve immün fonksiyonlara olumlu katkılar sağladığı bilinmektedir (Lam vd., 2025). Kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımında, bu tür fonksiyonel gıdaların bireyin özgün ihtiyaçlarına göre seçilip vurgulanması söz konusudur. Başka bir deyişle, bireyin genetik yatkınlıkları veya sağlık durumuna göre belirli fonksiyonel bileşenlerden zengin gıdaların diyetle ön plana çıkarılması hedeflenir. Örneğin, kardiyovasküler hastalık riski yüksek bir bireyde omega-3 yağ asitlerince zengin balık ve yağlı tohumların tüketimine ağırlık verilmesi veya bağırsak mikrobiyotasında dengesizlik (disbiyozis) olan bir bireyde probiyotik içeren fermente süt ürünleri ile prebiyotik lif kaynaklarının artırılması, kişiselleştirilmiş fonksiyonel beslenme stratejilerine örnek olarak verilebilir. Nitekim folat metabolizması geninde belirli bir varyasyona sahip kişilerde, folik asit açısından zengin beslenmenin kardiyovasküler hastalık riskini azaltmada özellikle önemli olabileceği gösterilmiştir (Lam vd., 2025). Bu tür örnekler, fonksiyonel gıdaların akılcı kullanımı yoluyla bireyin genetik ve metabolik gereksinimlerine uygun beslenme düzenlemeleri yapılabileceğini ortaya koymaktadır.

Kişiselleştirilmiş beslenme, fonksiyonel gıdaların stratejik kullanımıyla birleştiğinde, bireyin sağlık potansiyelini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Mevcut araştırmalar, bu yaklaşımın kişinin diyetle uyumunu artırabildiğini ve sağlığa yönelik olumlu davranış değişikliklerini destekleyebildiğini göstermektedir (Celis-Morales vd., 2017). Bununla birlikte, kişiye özel beslenme planlarının uzun vadeli etkinliğini ve güvenliğini doğrulamak için daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır (Adams vd., 2020; Ordovas vd., 2018). Sonuç olarak, genetik, yaşam tarzı ve metabolik faktörlere dayalı kişiselleştirilmiş beslenme, değişen tüketici ihtiyaçları ve bilimsel ilerlemelerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan yeni bir beslenme paradigmasıdır. Fonksiyonel gıdalarla zenginleştirilmiş bu kişiye özel beslenme uygulamalarının, gelecekte beslenme rehberlerinde ve halk sağlığı stratejilerinde önemli bir yer tutması beklenmektedir (Roman vd., 2024).

2. Akıllı Gıda Sistemlerinin Temelleri

Akıllı gıda sistemleri, üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda ileri teknolojilerin (IoT, yapay zekâ, büyük veri analitiği) ve biyolojik bilimlerin

entegre edilmesiyle gıda güvenliği, kalite kontrolü ve kişiselleştirilmiş beslenme gibi alanlarda inovatif çözümler sunan sistemlerdir (Rejeb vd., 2021; Shoomal vd., 2024). Bu sistemler, geleneksel gıda tedarik zincirlerine kıyasla dinamik izleme, veri toplama ve analiz kabiliyetleri ile ürün kalitesini artırmayı, tüketici taleplerine daha hassas yanıt verebilmeyi ve israfı azaltmayı hedeflemektedir (Shoomal vd., 2024).

Akıllı gıda sistemlerinin temel bileşenleri arasında fiziksel sensörler (sıcaklık, nem, pH, gaz analizi gibi), RFID/NFC etiketler, akıllı cihazlar (örneğin, akıllı tartılar veya buzdolapları), veri toplama altyapıları ve yapay zekâ algoritmaları bulunmaktadır (de Abreu ve van Deventer, 2022). Bu bileşenler, gıdanın üretim koşullarından raf ömrüne kadar geçen süreçte kritik verileri toplamakta ve bu verilerin işlenmesiyle gıda güvenliği ve kalitesi hakkında çıkarımlar yapılmasını sağlamaktadır. Özellikle fonksiyonel gıdalar alanında, belirli biyolojik etkileri hedefleyen içeriklerin (ör. omega-3 yağ asitleri, probiyotikler) kişiselleştirilmiş şekilde sunulabilmesi için akıllı sistemlerin sunduğu veri odaklı yaklaşım büyük önem taşımaktadır (Ordovas vd., 2018).

Gıdalarda “akıllı” kavramı, ürünün çevresel koşullara tepki verebilme, kalite değişimlerini algılayabilme ve gerektiğinde tüketiciye veya üreticiye bilgi iletebilme özellikleri taşımasını ifade eder (Drago vd., 2020). Bir gıdanın veya ambalajın “akıllı” sayılabilmesi için algılama, kayıt, iletişim ve tepki verebilme gibi yeteneklere sahip olması beklenir (Abekoon vd., 2024).

Örneğin, akıllı ambalaj sistemleri içerisinde entegre edilen sensörler sayesinde ürünlerin sıcaklık, nem ve gaz değişimleri izlenebilmekte ve bu değişimler tüketiciye renk değişimi, gösterge işaretleri veya mobil bildirimler yoluyla iletelebilmektedir (Fuertes vd., 2016). Ayrıca, akıllı ambalajlar QR kodlar, RFID çipleri ve hatta blockchain destekli veri akış sistemleri sayesinde gıdanın tarladan sofraya kadar olan tüm yolculuğunu şeffaf bir şekilde belgeleyebilmektedir (Rejeb vd., 2021).

Akıllı gıda entegrasyonu yalnızca ambalajla sınırlı değildir; akıllı mutfak teknolojileri (ör. internete bağlı buzdolapları, akıllı fırınlar) da tüketicilerin gıdayla etkileşimini değiştirmiştir. Bu sistemler, gıda stoğunu izleyebilir, son kullanma tarihlerini yönetebilir ve kullanıcıya bireysel beslenme ihtiyaçlarına uygun tarifler önerebilir (Shoomal vd., 2024).

IoT (Nesnelerin İnterneti), yapay zekâ (AI) ve büyük veri analizi, akıllı gıda sistemlerinin en önemli itici güçleridir. IoT teknolojileri, gıdaya entegre edilen sensörler aracılığıyla sıcaklık, nem, basınç ve diğer çevresel parametreleri sürekli izlerken; bu veriler bulut tabanlı platformlara aktarılır

ve gerçek zamanlı değerlendirmeye tabi tutulur (de Abreu ve van Deventer, 2022; Shoomal vd., 2024).

Yapay zekâ sistemleri, bu büyük veri yığınlarını işleyerek örüntüleri tanır, anormallikleri tespit eder ve gerektiğinde otomatik müdahaleler gerçekleştirebilir. Örneğin, bir üretim hattında sıcaklık sensörlerinden gelen verilerin analiziyle ürün bozulması riski öngörülebilir ve süreçler otomatik olarak optimize edilebilir (Rejeb vd., 2021). Yapay zekâ ayrıca, bireysel tüketici verileri (genetik bilgi, yaşam tarzı, hastalık geçmişi gibi) ile beslenme bilgilerini eşleştirerek kişiye özel gıda önerileri oluşturabilir (Ordovas vd., 2018).

Veri analitiği ise IoT ve yapay zekâdan gelen verilerin uzun vadeli analiziyle tüketim trendlerini, sağlık risklerini ve ürün geliştirme fırsatlarını ortaya çıkarır. Bu sayede gıda sektörü, sadece ürün kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda tüketici davranışlarını da daha iyi anlayarak kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların geliştirilmesini destekler (Fuertes vd., 2016).

Özellikle kişiselleştirilmiş beslenme bağlamında, IoT ve yapay zekâ destekli sistemler sayesinde bireylerin günlük sağlık verileri (ör. aktivite düzeyi, kan şekeri takibi) ile anlık gıda önerileri yapılabilir hale gelmiş, böylece sağlığı destekleyici bireyselleştirilmiş beslenme planları uygulanabilir olmuştur (Berry vd., 2020).

3. Nanoteknolojik Taşıyıcı Sistemler ve Kontrollü Salım

Nanoteknolojik taşıyıcı sistemler, fonksiyonel bileşenlerin etkin bir şekilde taşınmasını ve salımını sağlamak amacıyla geliştirilmiş ileri düzey yapılar olup, fonksiyonel gıdaların biyoeffektifliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır (Tan ve McClements, 2021). Bu sistemler genellikle, hedef bileşenleri çevresel etmenlerden (ısı, pH, ışık, oksidasyon vb.) korumak, çözünürlüğünü artırmak ve biyoyararlanımını iyileştirmek için kullanılır (Singh vd., 2009).

En yaygın nanoteknolojik taşıyıcı sistemler arasında şunlar yer alır:

Nanoemülsiyonlar: 20–200 nm çapında damlacık boyutuna sahip, iki fazlı (genellikle yağ-su) sistemlerdir. Yüksek kinetik stabiliteye sahip nanoemülsiyonlar, hidrofobik (suya az çözünen) bileşenlerin suda dağılılabirliğini artırarak biyoyararlanımı geliştirmektedir (McClements, 2004). Fonksiyonel bileşenlerin korunmasında ve sindirim sistemi boyunca taşınmasında oldukça etkilidirler.

Nanokapsüller: Bir aktif maddeyi çekirdek olarak kapsülleyen ve dışta bir polimerik veya lipidik kabukla korunan sistemlerdir. Özellikle kontrollü

salım sağlayarak bileşenlerin hedef doku veya organlara ulaşmasına imkân tanır (Taylor vd., 2005).

Liposomlar: Fosfolipid çift katmanlarından oluşan küresel veziküllerdir. Hem hidrofilik (suya çözünen) hem de lipofilik (yağda çözünen) maddeleri kapsülleyebilme yeteneğine sahiptirler (Mozafari, 2010). Biyolojik uyumlulukları ve vücut hücre zarlarına benzerlikleri nedeniyle taşıyıcı olarak büyük avantaj sağlarlar.

Bunun yanında, solid lipid nanoparticles (SLNs) ve nanostructured lipid carriers (NLCs) gibi yeni nesil lipid bazlı nanotaşıyıcılar da geliştirilmiştir. Bu yapılar, özellikle lipofilik biyoaktif bileşiklerin stabilitesinin artırılması ve taşınmasında etkili olmaktadır (Fathi vd., 2012).

Nanoteknolojik taşıyıcılar, aktif bileşenlerin yalnızca istenilen bölge veya ortam koşullarında salınmasını sağlayarak hedefe yönelik bir tedavi veya fonksiyonel etki sunar (Wang vd., 2024). Örneğin, sindirim sisteminde belirli bir pH değerinde çözünerek aktif bileşeni serbest bırakabilen nanotaşıyıcılar geliştirilmiştir (Gonçalves vd., 2023). Bu strateji, fonksiyonel gıdalarda örneğin probiyotiklerin mide asidinden korunup bağırsakta serbest bırakılması veya antioksidanların doğrudan kolon bölgesinde salımı gibi hedefli uygulamalara imkân tanımaktadır.

Hedefe yönelik salım sistemleri aynı zamanda; fonksiyonel bileşenlerin düşük konsantrasyonlarda bile etkili olmasını sağlar, yan etkileri azaltır, etkinliğin süresini artırır (Wang vd., 2024). Örneğin, fitokimyasallar (polifenoller, karotenoidler gibi) gibi oksidatif hasara hassas bileşikler, nanotaşıyıcı sistemlerle stabilize edilerek hedef dokularda daha kontrollü bir şekilde salınabilmektedir (Tan ve McClements, 2021).

Bir fonksiyonel bileşenin sağlık üzerindeki etkisi, yalnızca diyetle bulunmasıyla değil, vücut tarafından emilmesi ve kullanılabilir hale gelmesiyle mümkündür. Bu noktada, biyoyararlanım (bioavailability) kavramı devreye girer. Pek çok biyoaktif bileşen (örneğin, kurkumin, resveratrol, omega-3 yağ asitleri) doğrudan tüketildiğinde düşük biyoyararlanıma sahiptir; yani vücutta etkili konsantrasyonlara ulaşamaz (Yuan vd., 2020).

Nanoteknolojik taşıyıcı sistemler, biyoyararlanımı artırmak için çeşitli mekanizmalarla çalışır:

Çözünürlük Artışı: Hidrofobik bileşiklerin sulu ortamlarda daha iyi dağılmasını sağlar (McClements, 2004).

Koruma: Sindirim enzimlerinden veya mide asidinden koruyarak aktif bileşiğin bozulmadan bağırsaklara ulaşmasını sağlar (Fathi vd., 2012).

Hücre Zarlarından Geçişin Kolaylaştırılması: Nanopartikül boyutundaki sistemler, intestinal epitel hücrelerinden daha kolay geçebilir, bu da biyolojik erişimi artırır (Mozafari, 2010). Örneğin, kurkuminin (zerdeçalın aktif bileşeni) klasik formülasyonlarda biyoyararlanımı çok düşükken, nanoemülsiyon sistemleriyle taşındığında emilim oranı 5-10 kat artabilmektedir (Gonçalves vd., 2023). Dolayısıyla, nanoteknolojik taşıyıcı sistemler fonksiyonel gıdalarda hem etkililik hem de güvenlik açısından devrim yaratmaktadır. Bireyselleştirilmiş beslenme yaklaşımlarında bu sistemlerin kullanımı, özellikle genetik veya metabolik özelliklerine göre belirli bileşenlere ihtiyaç duyan bireyler için son derece stratejik bir rol oynamaktadır.

4. Biyosensörler ve Gıda-İzleme Teknolojileri

Biyosensörler, belirli bir biyolojik analiti algılayarak bu bilgiyi ölçülebilir bir sinyale dönüştüren cihazlardır. Temel bileşenleri bir biyoreseptör (enzim, antikor, DNA gibi) ve bir transdüser (elektiriksel, optik, piezoelektrik dönüştürücü) içerir (Turner, 2013). Fonksiyonel gıda alanında biyosensörler, bireyin sağlık durumunu gerçek zamanlı olarak izlemek ve buna uygun beslenme önerileri sunmak amacıyla kullanılmaktadır.

Vücut içi sensörler, genellikle implant edilebilir ya da ingestible (yutulabilir) formdadır. İmplant edilebilen glikoz sensörleri (örneğin diyabet yönetiminde kullanılan sürekli glikoz izleme cihazları) bireyin kan şekeri düzeylerini anlık olarak ölçer (Heikenfeld vd., 2018). Yakın gelecekte geliştirilmekte olan yutulabilir sensörler, mide veya bağırsakta pH, sıcaklık, basınç ve belirli biyomolekülleri izleyerek sindirim sürecine dair ayrıntılı bilgiler sağlayabilecektir (Kalantar-Zadeh vd., 2017).

Vücut dışı sensörler ise genellikle cilt yüzeyine takılan, giyilebilir teknolojiler (örneğin akıllı saatler, bantlar) veya çevresel sensörler (örneğin gıdaya entegre edilmiş sensör filmleri) şeklinde kullanılmaktadır. Bu sensörler, ter, tükürük veya solunum gibi vücut sıvılarından glikoz, laktat, elektrolit gibi parametreleri izleyebilir (Bandodkar vd., 2016). Böylece bireyin fizyolojik durumu hakkında invaziv olmayan bir şekilde veri toplanabilir.

Gerçek zamanlı izleme, fonksiyonel gıdaların etkin tüketimini yönlendirebilmek açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle glikoz, vitaminler ve alerjenlerin takibi, kişiselleştirilmiş beslenme planlarının uyarlanmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

Glikoz takibi: Gelişmiş glikoz sensörleri hem kan hem de ter yoluyla glikoz seviyelerini izleyebilmekte, bu da bireylerin karbonhidrat alımlarını anlık ihtiyaçlarına göre ayarlamalarını sağlamaktadır (Heikenfeld vd., 2018).

Bu tür sensörlerin, kişiselleştirilmiş düşük glisemik indeksli gıda önerileriyle birleştirilmesi, diyabet yönetiminde devrim yaratacak potansiyele sahiptir.

Vitamin takibi: Vücuttaki vitamin düzeylerinin izlenmesi, eksikliklerin erkenden tespit edilmesini ve buna uygun fonksiyonel gıda takviyeleri ile bireysel desteklerin planlanmasını mümkün kılar. Örneğin, yakın dönemde geliştirilen optik sensörler, deri üzerinden D vitamini düzeyini ölçmeye yönelik çalışmalar yapmaktadır (Sempionatto vd., 2020).

Alerjen takibi: Alerjenlere hassas bireyler için, gıda ürünlerinde gluten, fındık proteinleri veya laktoz gibi alerjenlerin varlığını tespit eden taşınabilir biyosensörler geliştirilmektedir (Weng vd., 2016). Bu sensörler sayesinde tüketiciler, tükettikleri gıdaların içeriklerini hızlı bir şekilde analiz edebilmekte ve alerjik reaksiyon risklerini azaltabilmektedir.

Bu sensörlerin verileri, mobil uygulamalar veya bağlı cihazlar aracılığıyla analiz edilerek bireyin o anki sağlık durumu doğrultusunda gerçek zamanlı gıda seçimlerine rehberlik edebilmektedir (Bandodkar vd., 2016).

Akıllı ambalajlar, gıda ürünlerinin tazeliği, güvenliği ve kalitesini izleyen ve tüketiciye bilgi veren sistemlerdir. Bunlar, sensörler, indikatörler veya RFID etiketleri içererek ürünlerin çevresel koşullara verdiği yanıtı algılayabilir (Han vd., 2018).

Öne çıkan akıllı ambalaj türleri şunlardır:

Tazelik indikatörleri: Ürün tazeliği veya bozulma düzeyini gösterir. Örneğin, et ürünlerinde bakteriyel büyümeyle oluşan uçucu aminlerin konsantrasyonuna bağlı olarak renk değiştiren sensörler geliştirilmiştir (Fuertes vd., 2016).

Gaz sensörleri: Oksijen, karbondioksit veya amonyak gibi gazların yoğunluğunu izleyerek ürünün bozulup bozulmadığını gösterir.

Sıcaklık zaman göstergeleri (TTI): Soğuk zincir boyunca sıcaklık sapmalarını kaydederek, ürünün doğru koşullarda saklanıp saklanmadığını izler (Taoukis, 2008).

Akıllı ambalaj sistemleri, fonksiyonel gıdaların etkinliğini korumak açısından özellikle önemlidir. Örneğin, probiyotik içeren bir üründe, canlı mikroorganizmaların canlılığını etkileyen sıcaklık ve nem değişimleri bu sistemler aracılığıyla tespit edilebilir ve tüketiciye doğru tüketim zamanı hakkında bilgi verilebilir (Han vd., 2018).

Ayrıca, blockchain teknolojisiyle entegre edilen akıllı ambalaj çözümleri sayesinde, bir ürünün üretiminden tüketiciye ulaşana kadar geçen tüm

süreç şeffaf bir şekilde kayıt altına alınabilir, bu da özellikle yüksek değerli fonksiyonel gıdalarda güven ve izlenebilirlik açısından önemli avantajlar sunar (Paliwal vd., 2020).

5. Yapay Zekâ ile Beslenme Verilerinin Yorumlanması

Yapay zekâ (AI), büyük ve karmaşık veri kümelerinden anlamlı desenler ve içgörüler çıkarma kapasitesi sayesinde kişisel sağlık verilerinin analizinde devrim yaratmıştır. Özellikle beslenme bilimi ve fonksiyonel gıda alanında, genetik veriler, mikrobiyota profilleri, metabolomik analizler, fiziksel aktivite düzeyleri, kan biyokimya sonuçları gibi çok çeşitli bireysel veri türleri yapay zekâ algoritmalarıyla entegre edilerek kişiye özel beslenme planlarının oluşturulmasına imkân tanımaktadır (de Toro-Martín vd., 2017).

Makine öğrenimi (ML) algoritmaları, özellikle bireylerin genetik varyasyonları ile beslenme ihtiyaçları arasındaki ilişkileri modellemek ve böylece spesifik diyet önerileri geliştirmek için kullanılmaktadır (Topol, 2019). Örneğin, bir kişinin lipid metabolizmasında rol oynayan gen varyantları (örneğin APOE genotipi) analiz edilerek, ona uygun yağ profiline sahip bir diyet tasarlanabilir (Abeltino vd., 2024).

Bunun yanı sıra, derin öğrenme (DL) algoritmaları kullanılarak, bireyin günlük sağlık verileri (adım sayısı, kalp atış hızı, uyku kalitesi gibi) ile besin alım kayıtları arasında ilişki kurularak enerji dengesi ve besin ihtiyaçları dinamik olarak güncellenebilmektedir (Chhetri, 2024). Böylece bireyin mevcut sağlık durumu ve yaşam tarzı değişkenlerine göre sürekli optimize edilen beslenme önerileri sunulabilmektedir.

Yapay zekâ destekli dinamik gıda öneri sistemleri, kişisel veriler ve büyük ölçekli gıda veri tabanları arasındaki ilişkiyi analiz ederek bireyler için en uygun gıda seçeneklerini belirlemektedir (Côté ve Lamarche, 2022). Bu sistemler, kullanıcının genetik yatkınlıkları, hastalık geçmişi, biyobelirteç seviyeleri ve yaşam tarzı verilerini dikkate alarak spesifik fonksiyonel gıdaların veya takviyelerin önerilmesini sağlar.

Örneğin, bir bireyin genetik analizinde D vitamini metabolizmasında yavaş işleyen bir varyant tespit edilmişse, AI destekli bir sistem bu kişiye D vitamini zengini gıdalar veya takviyeler önerebilir. Aynı şekilde, yüksek LDL kolesterol düzeyi tespit edilen bir kullanıcı için AI sistemi, bitki sterollerini ve çözünür lif içeren gıdaların tüketimini artıracak bir plan sunabilir (de Toro-Martín vd., 2017).

Gelişmiş sistemler, yalnızca bireyin mevcut sağlık verilerini değil, aynı zamanda tüketim davranışlarını, damak tadı tercihlerini, kültürel

beslenme alışkanlıklarını ve erişilebilirlik faktörlerini de modellemekte ve böylece kullanıcı dostu, sürdürülebilir ve uygulanabilir diyet önerileri geliştirebilmektedir (Côté ve Lamarche, 2022).

Bazı ileri uygulamalar, yapay zekâ destekli mobil uygulamalar üzerinden kullanıcılardan sürekli veri toplayarak, önerileri anlık güncelleyebilmekte, böylece diyetteki küçük değişikliklere veya günlük aktivite farklılıklarına bile hızlıca uyum sağlayabilmektedir (Topol, 2019).

Kişisel sağlık verilerinin bu derece kapsamlı ve hassas biçimde toplanması, analiz edilmesi ve kullanılması, beraberinde önemli veri gizliliği ve etik tartışmaları da getirmektedir. Sağlık verileri, bireylerin mahremiyet hakları açısından en yüksek koruma gerektiren veri kategorisindedir (Shabani ve Marelli, 2019).

Özellikle genetik bilgiler, metabolomik veriler veya bağırsak mikrobiyomu profilleri gibi biyolojik imzalar, yalnızca bireysel sağlık hakkında değil, aynı zamanda akrabalık ilişkileri ve hastalık riskleri hakkında da hassas bilgiler içerebilir. Bu verilerin kötüye kullanılması veya izinsiz paylaşılması hem bireysel hem de toplumsal düzeyde ciddi etik sorunlar doğurabilir (Shabani ve Marelli, 2019).

Bu nedenle, kişisel sağlık verilerinin yapay zekâ sistemlerinde kullanılması için aşağıdaki etik ilkelerin sağlanması önerilmektedir:

Veri gizliliği ve güvenliği: Verilerin şifrelenmesi, anonimleştirilmesi ve sadece yetkilendirilmiş kullanıcılar tarafından erişilmesi.

Bilgilendirilmiş onam: Verilerin nasıl kullanılacağına dair açık, anlaşılır ve şeffaf bilgilendirme yapılması.

Veri mülkiyeti: Bireylerin kendi sağlık verileri üzerinde tam kontrol hakkına sahip olması.

Adalet ve erişilebilirlik: Yapay zekâ temelli beslenme önerilerinin sadece belirli sosyal gruplara değil, tüm bireylere eşit erişim sağlayacak şekilde tasarlanması (Shabani ve Marelli, 2019).

Ayrıca, algoritmik önyargıların (bias) önlenmesi de önemlidir; örneğin, eğitilmiş veri kümelerinin demografik çeşitliliği yeterince yansıtmaması, belirli etnik veya sosyoekonomik gruplar için hatalı öneriler üretilmesine yol açabilir (Chhetri, 2024).

Sonuç olarak, yapay zekâ ile kişisel beslenme verilerinin yorumlanması büyük potansiyel taşısa da bu süreçte etik prensiplere, veri gizliliğine ve birey

haklarına öncelik verilmesi gereklidir. Bu yaklaşım hem bilimsel ilerlemenin sürdürülebilirliğini hem de toplumun teknolojiye olan güvenini koruyacaktır.

6. Tüketici Deneyimi ve Kullanıcı Odaklı Gıda Tasarımı

Fonksiyonel gıdaların başarısı yalnızca sağlık etkileriyle değil, aynı zamanda tüketici beklentilerine hitap eden tat, doku ve aroma özellikleriyle de belirlenmektedir. Kişiselleştirilmiş beslenme anlayışı, bireylerin genetik, kültürel ve psikolojik farklılıklarını dikkate alarak kişiye özel tat profili oluşturmayı ve buna uygun gıda tasarımı yapmayı amaçlamaktadır (Escalante-Aburto vd., 2021).

Araştırmalar, bireyler arasındaki tat algısının genetik varyasyonlardan (örneğin TAS2R38 geni ve acı tat algısı) etkilendiğini göstermektedir (Garcia-Bailo vd., 2009). Bu bağlamda, bireylerin genetik tat duyarlılıklarına göre özelleştirilmiş gıdalar tasarlamak mümkündür. Örneğin, acı tatlara hassas bireyler için daha az acı profile sahip sebze bazlı ürünler veya kafeinsiz içecek alternatifleri geliştirilebilir.

Bununla birlikte, gıda yapılandırması teknolojileri sayesinde, gıdaların fiziksel özellikleri (örneğin gevreklik, kıvam, viskozite) bireysel tercihlere göre ayarlanabilmektedir. 3D gıda baskısı (three-dimensional food printing) gibi yeni nesil teknolojiler, tüketiciye özel besin profile ve tat/aroma tercihlerine göre gıda ürünleri üretebilme imkânı sunmaktadır (Sun vd., 2018).

Dolayısıyla, kişiye özel tat profili oluşturulması ve gıda yapılandırması hem tüketici memnuniyetini artırmakta hem de bireylerin önerilen fonksiyonel gıdaları benimsemesini kolaylaştırmaktadır.

Kişiselleştirilmiş gıda sistemlerinin tüketici tarafından benimsenmesi için, kullanıcı dostu platformlar ve mobil uygulamalar kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür sistemler, bireyin sağlık verilerini, damak tadı tercihlerini ve günlük alışkanlıklarını toplayarak, kolayca anlaşılabilir ve uygulanabilir beslenme önerileri sunmayı hedefler (de Toro-Martín vd., 2017).

Örneğin, bazı mobil uygulamalar, kullanıcının yediği gıdaların fotoğrafını analiz ederek içerik ve kalori tahmini yapabilmekte ve buna göre kişisel beslenme hedeflerine uygun önerilerde bulunabilmektedir (Wang, 2016). Diğer taraftan, genetik veriye dayalı beslenme önerileri sunan uygulamalar, DNA test sonuçlarına entegre olarak bireye özel vitamin, mineral ve makrobesin ihtiyaçlarını raporlayabilmektedir (Ordovas vd., 2018).

Başarılı kullanıcı deneyimi sağlayan platformlar basit, sezgisel arayüzler, gerçek zamanlı veri entegrasyonu, kişisel hedeflere göre uyarlanabilir öneriler,

eğitim ve motivasyon unsurları (örneğin haftalık raporlar, başarı rozetleri) gibi ortak özelliklerde sunar.

Bu platformlar sayesinde tüketiciler, fonksiyonel gıda tüketimini bilinçli bir şekilde yönetebilir, sağlık hedeflerine daha etkin ulaşabilir ve bireysel davranış değişikliklerini sürdürebilir hale gelirler.

Kullanıcı odaklı gıda tasarımı bir diğer önemli unsur, davranışsal geri bildirim sistemlerinin entegrasyonudur. Bu sistemler, bireyin tüketim davranışlarını sürekli izleyerek, motivasyonu artırıcı ve davranış değişimini destekleyici geri bildirimler sağlar (Cadario, 2020).

Örneğin, akıllı mobil uygulamalar veya giyilebilir cihazlar, kullanıcının adım sayısını, su tüketimini veya lif alımını izleyerek gün sonunda hedeflerine ulaşp ulaşmadığını bildiren bildirimler gönderebilir. Başarı durumunda ödüllendirici geri bildirimler (örneğin sanal rozetler, puanlar), hedefe ulaşamadığında ise yapıcı uyarılar ve basit tavsiyeler sunulabilir (McCarroll vd., 2017).

Davranışsal geri bildirim sistemlerinin etkili olabilmesi için; gerçek zamanlı ve kişiye özgü olması, pozitif pekiştirme tekniklerini kullanması, kullanıcının ilerlemesini açıkça gösterebilmesi gerekmektedir (Cadario, 2020).

Özellikle fonksiyonel gıda tüketimi gibi uzun vadeli alışkanlık değişimi gerektiren alanlarda, bireyin motivasyonunu canlı tutmak için bu tür sistemlerin kullanılması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, kişiye özel tat profili oluşturma, kullanıcı dostu dijital platformlar ve davranışsal geri bildirim sistemleri birlikte çalışarak, tüketici deneyimini geliştirir ve kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların benimsenmesini destekler. Bu yaklaşım, sadece bireysel sağlık iyileştirmelerine değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda sektöründe sürdürülebilir tüketici bağlılığının oluşmasına da katkı sağlar.

7. Zorluklar ve Gelecekteki Araştırma Alanları

Fonksiyonel gıdaların kişiselleştirilmiş beslenme ile birleştiği noktada ortaya çıkan nanoteknolojik, biyosensör temelli ve yapay zekâ destekli sistemler, teorik olarak büyük bir potansiyel barındırır da uygulamada önemli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar hem teknolojik hem de biyolojik düzeyde kendini göstermektedir (McClements, 2023; Tsolakidis vd., 2024).

Teknolojik sınırlamalar arasında en başta gelişmiş taşıyıcı sistemlerin ölçeklenebilirliği yer almaktadır. Nanoemülsiyonlar, liposomlar, nanokapsüller gibi sistemler laboratuvar koşullarında etkili performans sergilese de, endüstriyel düzeyde üretimleri sırasında kararlılık, maliyet ve sürdürülebilirlik gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir (Mozafari, 2010). Ayrıca bu taşıyıcıların insan vücudundaki uzun vadeli biyouyumluluğu ve potansiyel toksisitesi halen tartışmalıdır (McClements ve Xiao, 2017).

Biyolojik sınırlamalar ise bireyler arası yüksek düzeyde farklılık gösteren genetik, epigenetik, metabolik ve mikrobiyal profillerin tam anlamıyla çözümlenememiş olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, aynı fonksiyonel gıda bileşeni bazı bireylerde fayda sağlarken diğerlerinde etkisiz ya da olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Abeltino vd., 2024). Bu durum, kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıda önerilerinin güvenilirliğini ve etkinliğini sınırlandırmaktadır.

Ayrıca, yapay zekâ algoritmalarının veri setleri çoğu zaman sınırlı veya temsili olmayan örneklemelere dayandığı için algoritmik önyargı (bias) riski taşımaktadır. Bu da belirli sosyoekonomik veya etnik grupların öneri sistemlerinde dışlanmasına yol açabilir (Chhetri, 2024).

Kişiselleştirilmiş fonksiyonel beslenme sistemlerinin yaygınlaşmasında en önemli engellerden biri de regülasyon ve standardizasyon eksikliğidir. Mevcut ulusal ve uluslararası gıda mevzuatları, genellikle klasik gıda tanımları ve popülasyon temelli beslenme önerileri çerçevesinde hazırlanmıştır. Bu çerçevede, bireye özel formüle edilen, genetik veri kullanan veya yapay zekâ tabanlı öneriler sunan gıdaların hukuki statüsü belirsizdir (Marcum, 2020).

Özellikle Avrupa Birliği'nde "novel food" (yeni gıda) kategorisine giren nanoteknolojik taşıyıcılar veya biyolojik veri temelli fonksiyonel gıdalar için ayrı izin süreçleri uygulanmaktadır ve bu süreçler oldukça uzun ve maliyetlidir (Turck vd., 2021). Benzer şekilde, Amerika Birleşik Devletleri'nde bu tür ürünlerin FDA tarafından "nutraceutical" veya "medical food" olarak sınıflandırılıp sınıflandırılmayacağı tartışmalıdır.

Diğer taraftan, kişisel verilerin kullanıldığı dijital sağlık uygulamaları ve mobil gıda öneri sistemleri de veri gizliliği, şeffaflık ve algoritma denetimi açısından yasal boşluklar içermektedir (Shabani ve Marelli, 2019). Tüm bu düzenleyici belirsizlikler, sektörde yatırımcıların çekimser kalmasına ve yeniliklerin yaygınlaşmasının yavaşlamasına neden olmaktadır.

Tüm bu zorluklara rağmen, fonksiyonel gıdalarla kişiselleştirilmiş beslenmenin keşişiminde çok sayıda araştırma ve inovasyon fırsatı

bulunmaktadır. Özellikle aşağıdaki alanlar gelecekte ön plana çıkması beklenen başlıca konulardır:

Nutrigenetik ve mikrobiyom temelli modellerin entegrasyonu: Genetik yatkınlıklar ve bağırsak mikrobiyotası profilleri bir arada değerlendirilerek daha hassas beslenme önerileri geliştirilebilir (Abeltino vd., 2024).

Giyilebilir ve ingestible sensör teknolojilerinin gelişimi: Ter, tükürük, dışkı ve hatta mide içeriği analizini yapabilen miniaturize sensörlerle bireyin beslenme durumu daha yakından izlenebilir (Heikenfeld vd., 2018).

Yapay zekâ destekli gıda tasarımı: Kullanıcı verilerini gerçek zamanlı analiz eden AI sistemleri hem bireye özel beslenme planları hem de dinamik ürün formülasyonları (ör. 3D yazıcılarla üretilen özelleştirilmiş gıdalar) geliştirebilir (Tsolakidis vd., 2024).

Etik veri yönetimi platformları: Bireylerin sağlık verilerini güvenli ve şeffaf biçimde yönetebileceği, veri sahipliğinin kullanıcılarda olduğu “kişisel veri kasaları” (personal data vaults) gibi dijital altyapılar araştırma odağı haline gelmektedir (Shabani ve Marelli, 2019).

Sürdürülebilir ve bitki bazlı fonksiyonel içerikler: Çevresel etkiler göz önüne alınarak hem insan sağlığına faydalı hem de ekolojik ayak izi düşük biyoaktif bileşenlerin (ör. mikrobiyal proteinler, alg bazlı lifler) kullanımı yaygınlaştırılabilir (Nozari vd., 2022).

Bu bağlamda, disiplinler arası iş birlikleri (beslenme bilimi, veri bilimi, biyoteknoloji, hukuk ve etik) teşvik edilmeli ve hem bireylerin sağlığını iyileştirecek hem de toplumun dijital sağlık okuryazarlığını artıracak sistemler geliştirilmeye devam edilmelidir.

8. Sonuç: Gıda-Teknoloji İlişkisini Yeniden Tanımlamak

Son yıllarda yaşanan teknolojik devrim, sadece sağlık hizmetleri ya da mühendislik alanlarında değil, aynı zamanda gıda sistemlerinde de radikal bir dönüşüm başlatmıştır. Fonksiyonel gıdaların kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımlarıyla birleşmesi hem bireysel sağlık optimizasyonunu hem de kamu sağlığının iyileştirilmesini hedefleyen yeni nesil bir beslenme paradigması doğurmuştur (Côté ve Lamarche, 2022; de Toro-Martín vd., 2017). Bu paradigma, bireylerin genetik yapıları, metabolik tepkileri ve yaşam tarzı farklılıklarını dikkate alan, dinamik ve veri temelli gıda çözümlerini merkezine almaktadır.

Kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdalar, yalnızca bireylerin hastalık riskini azaltmakla kalmayıp, sağlıklı yaşam tarzlarının sürdürülebilirliğini

destekleyen araçlar olarak konumlanmaktadır (Ordovas vd., 2018). Toplum düzeyinde bu tür gıdaların benimsenmesi, obezite, diyabet, kardiyovasküler hastalıklar gibi yaygın kronik hastalıkların önlenmesi için önemli bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, bireylerin sağlıklarına yönelik proaktif bir tutum geliştirmelerini teşvik ederek, gıdanın tedavi edici değil, önleyici rolünü ön plana çıkarmaktadır (Bianchetti vd., 2023).

Bununla birlikte, bu gıdaların toplumdaki yerini yalnızca bireysel sağlık faydalarıyla sınırlamak yeterli değildir. Sosyoekonomik eşitsizlikler, dijital okuryazarlık düzeyi, kültürel beslenme alışkanlıkları gibi faktörler de kişiselleştirilmiş gıda sistemlerinin erişilebilirliğini ve kabulünü doğrudan etkilemektedir (Shabani ve Marelli, 2019). Bu nedenle, teknolojik ilerlemelerle birlikte bu sistemlerin kapsayıcı, adil ve kültürel olarak uyarlanabilir olması da büyük önem taşımaktadır.

Fonksiyonel gıdaların yapay zekâ, biyosensörler ve nanoteknolojik taşıyıcılar ile entegre biçimde sunulması, bilimsel ve teknolojik açıdan heyecan verici bir gelecek vadetse de bu gelişmeler etik, yasal ve sosyal sorumluluklar çerçevesinde değerlendirilmelidir (Marcum, 2020; McClements, 2023).

Her bireyin genetik verilerinin, sağlık geçmişinin ve davranışsal bilgilerinin yapay zekâ algoritmalarıyla analiz edilerek beslenme önerilerine dönüştürülmesi; mahremiyet, veri güvenliği ve algoritmik tarafsızlık gibi temel etik sorunları gündeme getirmektedir. Bu noktada, teknolojik ilerlemeyle insan hakları arasında bir denge kurulması, sistemlerin şeffaf, denetlenebilir ve adil şekilde çalışması sağlanmalıdır (Shabani ve Marelli, 2019).

Ayrıca, bilimsel temelli bireyselleştirilmiş gıda önerilerinin sadece elit bir kesimin erişimine açık kalması, toplumsal sağlık eşitsizliklerini derinleştirme riskini de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdaların geliştirilmesinde kamu yararını gözetten bir inovasyon anlayışı benimsenmeli; bu gıdaların tüm toplumsal kesimler için erişilebilir, ekonomik ve güvenilir olması hedeflenmelidir (Côté ve Lamarche, 2022).

Sonuç olarak, kişiselleştirilmiş fonksiyonel gıdalar, yalnızca bireyin sağlığını iyileştiren değil; aynı zamanda toplumun gıdayla kurduğu ilişkiyi dönüştüren bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın kalıcı, etik ve etkili olabilmesi için bilim, teknoloji ve insan odaklı etik ilkeler arasında hassas bir denge gözetilmelidir. Ancak bu şekilde, gıda bilimi 21. yüzyılda sadece bir beslenme aracı değil; aynı zamanda bireyin sağlığına, toplumsal eşitliğe ve sürdürülebilir kalkınmaya hizmet eden stratejik bir alan haline gelebilecektir.

Kaynakça

- Abekoon, T., Buthpitiya, B. L. S. K., Sajindra, H., Samarakoon, E. R. J., Jayakody, J. A. D. C. A., Kantamaneni, K., ve Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review to evaluate the synergy of intelligent food packaging with modern food technology and artificial intelligence field. *Discover Sustainability*, 5(1).
- Abeltino, A., Hatem, D., Serantoni, C., Riente, A., De Giulio, M. M., De Spirito, M., De Maio, F., ve Maulucci, G. (2024). Unraveling the Gut Microbiota: Implications for Precision Nutrition and Personalized Medicine. *Nutrients*, 16(22).
- Adams, S. H., Anthony, J. C., Carvajal, R., Chae, L., Khoo, C. S., Latulippe, M. E., Matusheski, N. V., McClung, H. L., Rozga, M., Schmid, C. H., Wopereis, S., ve Yan, W. (2020). Perspective: Guiding Principles for the Implementation of Personalized Nutrition Approaches That Benefit Health and Function. *Advances in Nutrition*, 11(1), 25-34.
- Bandodkar, A. J., Jeerapan, I., ve Wang, J. (2016). Wearable Chemical Sensors: Present Challenges and Future Prospects. *Acs Sensors*, 1(5), 464-482.
- Berry, S. E., Valdes, A. M., Drew, D. A., Asnicar, F., Mazidi, M., Wolf, J., Capdevila, J., Hadjigeorgiou, G., Davies, R., Al Khatib, H., Bonnett, C., Ganesh, S., Bakker, E., Hart, D., Mangino, M., Merino, J., Linenberg, I., Wyatt, P., Ordovas, J. M., Gardner, C. D., Delahanty, L. M., Chan, A. T., Segata, N., Franks, P. W. ve Spector, T. D. (2020). Human postprandial responses to food and potential for precision nutrition. *Nature Medicine*, 26(11), 964-973.
- Bianchetti, G., De Maio, F., Abeltino, A., Serantoni, C., Riente, A., Santarelli, G., Sanguinetti, M., Delogu, G., Martinoli, R., Barbaresi, S., De Spirito, M., ve Maulucci, G. (2023). Unraveling the Gut Microbiome-Diet Connection: Exploring the Impact of Digital Precision and Personalized Nutrition on Microbiota Composition and Host Physiology. *Nutrients*, 15(18).
- Cadario, R., ve Chandon, P. (2020). Which healthy eating nudges work best? A meta-analysis of field experiments. *Marketing Science*, 39(3), 465-486.
- Celis-Morales, C., Livingstone, K. M., Marsaux, C. F. M., Macready, A. L., Fallaize, R., O'Donovan, C. B., Woolhead, C., Forster, H., Walsh, M. C., Navas-Carretero, S., San-Cristobal, R., Tsigoti, L., Lambrinou, C. P., Mavrogianni, C., Moschonis, G., Kolossa, S., Hallmann, J., Godlewska, M., Surwillo, A., Traczyk, I., Drevon, C. A., Bouwman, J., van Ommen, B., Grimaldi, K., Parnell, L. D., Matthews, J. N., Manios, Y., Daniel, H., Martinez, J. A., Lovegrove, J. A., Gibney, E. R., Brennan, L., Saris, W. H., Gibney, M., Mathers, J. C., Food4Me Study. (2017). Effect of personalized nutrition on health-related behaviour change: evidence from the

- Food4Me European randomized controlled trial. *International Journal of Epidemiology*, 46(2), 578-588.
- Chhetri, K. B. (2024). Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Food Quality Control and Safety Assessment. *Food Engineering Reviews*, 16(1), 1-21.
- Côté, M., ve Lamarche, B. (2022). Artificial intelligence in nutrition research: perspectives on current and future applications. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 47(1), 1-8.
- de Abreu, C. L., ve van Deventer, J. P. (2022). The Application of Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Artificial Intelligence Research, Sacair 2021*, 1551, 32-46.
- de Toro-Martín, J., Arsenault, B. J., Després, J. P., ve Vohl, M. C. (2017). Precision Nutrition: A Review of Personalized Nutritional Approaches for the Prevention and Management of Metabolic Syndrome. *Nutrients*, 9(8).
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., ve Perego, P. (2020). Innovations in Smart Packaging Concepts for Food: An Extensive Review. *Foods*, 9(11).
- Escalante-Aburto, A., Trujillo-de Santiago, G., Alvarez, M. M., ve Chuck-Hernández, C. (2021). Advances and prospective applications of 3D food printing for health improvement and personalized nutrition. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5722-5741.
- Fathi, M., Mozafari, M. R., ve Mohebbi, M. (2012). Nanoencapsulation of food ingredients using lipid based delivery systems. *Trends in Food Science ve Technology*, 23(1), 13-27.
- Fuertes, G., Soto, I., Carrasco, R., Vargas, M., Sabattin, J., ve Lagos, C. (2016). Intelligent Packaging Systems: Sensors and Nanosensors to Monitor Food Quality and Safety. *Journal of Sensors*, 2016.
- Garcia-Bailo, B., Toguri, C., Eny, K. M., ve El-Sohemy, A. (2009). Genetic Variation in Taste and Its Influence on Food Selection. *Omics-a Journal of Integrative Biology*, 13(1), 69-80.
- Gonçalves, R. F. S., Vicente, A. A., ve Pinheiro, A. C. (2023). Incorporation of curcumin-loaded lipid-based nano delivery systems into food: Release behavior in food simulants and a case study of application in a beverage. *Food Chemistry*, 405.
- Han, J. W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J. P., ve Yang, X. T. (2018). Food Packaging: A Comprehensive Review and Future Trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 860-877.
- Heikenfeld, J., Jajack, A., Rogers, J., Gutruf, P., Tian, L., Pan, T., Li, R., Khine, M., Kim, J., Wang, J., ve Kim, J. (2018). Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects. *Lab on a Chip*, 18(2), 217-248.

- Kalantar-Zadeh, K., Ha, N., Ou, J. Z., ve Berean, K. J. (2017). Ingestible Sensors. *Acs Sensors*, 2(4), 468-483.
- Lam, H. N., Lin, S. P., Nguyen, D. H. N., Chen, C. M., Su, C. T., Fang, T. C., ve Li, S. C. (2025). Integrative Roles of Functional Foods, Microbiotics, Nutrigenetics, and Nutrigenomics in Managing Type 2 Diabetes and Obesity. *Nutrients*, 17(4).
- Marcum, J. A. (2020). Nutrigenetics/Nutrigenomics, Personalized Nutrition, and Precision Healthcare. *Current Nutrition Reports*, 9(4), 338-345.
- McCarroll, R., Eyles, H., ve Ni Mhurchu, C. (2017). Effectiveness of mobile health (mHealth) interventions for promoting healthy eating in adults: A systematic review. *Preventive Medicine*, 105, 156-168.
- McClements, D. J. (2004). *Food emulsions: principles, practices, and techniques*. CRC press.
- McClements, D. J. (2023). Bioactive Delivery Systems for Lipophilic Nutra-ceuticals Formulation, Fabrication, and Application. In *Next-generation Bioactive Delivery Systems*. The Royal Society of Chemistry.
- McClements, D. J., ve Xiao, H. (2017). Is nano safe in foods? Establishing the factors impacting the gastrointestinal fate and toxicity of organic and inorganic food-grade nanoparticles. *npj Science of Food*, 1(1), 6.
- Mozafari, M. R. (2010). Nanoliposomes: Preparation and Analysis. *Liposomes: Methods and Protocols*, Vol 1, 605, 29-50.
- Nozari, H., Szmelter-Jarosz, A., ve Ghahremani-Nahr, J. (2022). Analysis of the Challenges of Artificial Intelligence of Things (AIoT) for the Smart Supply Chain (Case Study: FMCG Industries). *Sensors*, 22(8).
- Ordovas, J. M., Ferguson, L. R., Tai, E. S., ve Mathers, J. C. (2018). Personalised nutrition and health. *Bmj-British Medical Journal*, 361.
- Paliwal, V., Chandra, S., ve Sharma, S. (2020). Blockchain Technology for Sustainable Supply Chain Management: A Systematic Literature Review and a Classification Framework. *Sustainability*, 12(18).
- Rejeb, A., Rejeb, K., Zailani, S., Treiblmaier, H., ve Hand, K. J. (2021). Integrating the Internet of Things in the halal food supply chain: A systematic literature review and research agenda. *Internet of Things*, 13.
- Roman, S., Campos-Medina, L., ve Leal-Mercado, L. (2024). Personalized nutrition: the end of the one-diet-fits-all era. *Frontiers in Nutrition*, 11.
- Sempionatto, J. R., Jeerapan, I., Krishnan, S., ve Wang, J. (2020). Wearable Chemical Sensors: Emerging Systems for On-Body Analytical Chemistry. *Analytical Chemistry*, 92(1), 378-396.
- Shabani, M., ve Marelli, L. (2019). Re-identifiability of genomic data and the GDPR Assessing the re-identifiability of genomic data in light of the EU General Data Protection Regulation. *Embo Reports*, 20(6).

- Shoomal, A., Jahanbakht, M., Componation, P. J., ve Ozay, D. (2024). Enhancing supply chain resilience and efficiency through internet of things integration: Challenges and opportunities. *Internet of Things*, 27.
- Singh, H., Ye, A. Q., ve Horne, D. (2009). Structuring food emulsions in the gastrointestinal tract to modify lipid digestion. *Progress in Lipid Research*, 48(2), 92-100.
- Sun, J., Zhou, W. B., Yan, L. K., Huang, D. J., ve Lin, L. Y. (2018). Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, 220, 1-11.
- Tan, Y. B., ve McClements, D. J. (2021). Plant-Based Colloidal Delivery Systems for Bioactives. *Molecules*, 26(22).
- Taoukis, P. S. (2008). Application of time-temperature integrators for monitoring and management of perishable product quality in the cold chain. *Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods*, 61-74.
- Taylor, T. M., Weiss, J., Davidson, P. M., ve Bruce, B. D. (2005). Liposomal nanocapsules in food science and agriculture. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 45(7-8), 587-605.
- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44-56.
- Tsolakidis, D., Gymnopoulos, L. P., ve Dimitropoulos, K. (2024). Artificial Intelligence and Machine Learning Technologies for Personalized Nutrition: A Review. *Informatics-Basel*, 11(3).
- Turck, D., Bresson, J. L., Burlingame, B., Dean, T., Fairweather-Tait, S., Heinenon, M., Hirsch-Ernst, K. I., Mangelsdorf, I., McArdle, H. J., Naska, A., Neuhauser-Berthold, M., Nowicka, G., Pentieva, K., Sanz, Y., Siani, A., Sjödin, A., Stern, M., Tomé, D., Vinceti, M., . . . Alle, E. P. D. P. N. (2021). Guidance on the preparation and submission of an application for authorisation of a novel food in the context of Regulation (EU) 2015/2283 (Revision 1). *EFSA journal*, 19(3).
- Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3184-3196.
- Wang, J. B., Cataldo, J. K., Ayala, G. X., Natarajan, L., Cadmus-Bertram, L. A., White, M. M., Madanat, H., Nichols, J. F. ve Pierce, J. P. (2016). Mobile and wearable device features that matter in promoting physical activity. *Journal of mobile technology in medicine*, 5(2), 2.
- Wang, X., Shi, G. H., Fan, S. F., Ma, J. M., Yan, Y. H., Wang, M. T., Tang, X. Z., Lv, P., ve Zhang, Y. (2024). Targeted delivery of food functional ingredients in precise nutrition: design strategy and application of nutritional intervention. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(22), 7854-7877.

- Weng, X., Gaur, G., ve Neethirajan, S. (2016). Rapid Detection of Food Allergens by Microfluidics ELISA-Based Optical Sensor. *Biosensors-Basel*, 6(2).
- Yuan, P. H., Cui, S. X., Liu, Y. F., Li, J. H., Du, G. C., ve Liu, L. (2020). Metabolic engineering for the production of fat-soluble vitamins: advances and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(3), 935-951.
- Zeevi, D., Korem, T., Zmora, N., Israeli, D., Rothschild, D., Weinberger, A., Ben-Yacov, O., Lador, D., Avnit-Sagi, T., Lotan-Pompan, M., Suez, J., Mahdi, J. A., Matot, E., Malka, G., Kosower, N., Rein, M., Zilberman-Schapira, G., Dohnalová, L., Pevsner-Fischer, M., Bikovsky, R., Halpern, Z., Elinav, E., Segal, E. (2015). Personalized Nutrition by Prediction of Glycemic Responses. *Cell*, 163(5), 1079-1094.

Fonksiyonel Gıdalarda Nanopartiküllerin Kullanımı: Fırsatlar ve Zorluklar

Nilay Akkus Taş¹

Özet

Nanoteknoloji, gıda biliminde fonksiyonel bileşenlerin stabilitesini koruma, biyoyararlanımını artırma ve hedefe yönelik kontrollü salımını sağlama gibi yenilikçi çözümler sunarak gıda endüstrisinde önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu kitap bölümü, nanoemülsiyonlar, lipozomlar ve biyopolimer bazlı nanotaşıyıcı sistemlerin fonksiyonel gıdalara entegrasyonunu ve metal oksit nanopartiküllerin antimikrobiyal ambalajlama teknolojilerindeki rolünü kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmada, nanoteknolojinin sunduğu bu fırsatların yanı sıra, nanopartiküllerin potansiyel toksikolojik etkileri, yasal düzenlemelerdeki küresel farklılıklar ve tüketici kabulü gibi kritik zorluklar ele alınmaktadır. Ayrıca, nanomalzemelerin gıdalardaki varlığını tespit etmek için kullanılan elektron mikroskopisi ve dinamik ışık saçılımı gibi ileri analiz teknikleri ile risk değerlendirme prosedürleri tartışılmaktadır. Sonuç olarak, nanoteknolojinin gelecekteki başarısının, yeşil nanoteknoloji yaklaşımları, sürdürülebilir üretim modelleri ve şeffaf yasal çerçevelerin geliştirilmesine bağlı olduğu vurgulanmaktadır.

1. Giriş

Nanoteknoloji, son yıllarda gıda biliminde devrim niteliğinde gelişmelere yol açarak gıda işleme, ambalajlama, koruma ve besin takviyeleri gibi pek çok alanda yenilikler sunmaktadır (Shah vd., 2024). Bu alandaki hızlı büyüme, yalnızca gıdanın kalitesini ve güvenliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda tüketicinin beslenme gereksinimlerine uygun fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine de olanak tanımaktadır (Singh, 2016). Fonksiyonel gıdalarda kullanılan nanoteknolojik uygulamalar, belirli biyoaktif bileşenlerin hedefe yönelik taşınması, biyoyararlanımlarının artırılması ve stabilitelerinin

1 Dr. Öğr. Üyesi, Amasya Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Amasya, Türkiye, nilayakkustas@amasya.edu.tr, 0009-0004-8644-6659

korunması gibi özelliklerle öne çıkmaktadır. Ancak, bu hızlı büyüme, sağlık ve güvenlik kaygıları, yasal düzenlemeler ve toplumun bu yeni teknolojiyi kabul etme düzeyi gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getirmiştir (Bouwmeester vd., 2009).

Nanoteknoloji, gıda bilimi bağlamında yenilikçi çözümler sunarak hem fonksiyonel hem de geleneksel gıda üretimini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Gıda matriksine entegre edilen nanopartiküller, biyoaktif bileşenlerin kontrollü salınımını ve stabilitesini artırarak belirli sağlık etkileri sağlamada önemli bir rol oynar (He ve Hwang, 2016). Bunun yanı sıra, nanokapsülasyon teknikleriyle vitaminler, probiyotikler ve antioksidanlar gibi bileşenlerin bağırsaklarda daha etkili bir şekilde emilmesi sağlanır. Örneğin, omega-3 yağ asitleri gibi oksidasyona duyarlı bileşenler nanoteknoloji sayesinde oksidatif bozulmadan korunabilmekte ve daha uzun raf ömrü elde edilebilmektedir (Sekhon, 2010). Gıda paketlenme sistemlerinde de nanoteknoloji kullanımı, gıdaların raf ömrünü uzatmak ve dış etkenlere karşı koruma sağlamak açısından önemlidir. Antimikrobiyal nanopartiküller veya aktif ambalajlama materyalleri, mikroorganizma gelişimini önleyerek gıda güvenliğini artırır (Silvestre vd., 2011). Nanoteknolojinin gıda sektöründe yükselişi hem akademik hem de endüstriyel alanda yoğun araştırmalara konu olmuştur. Bu yükselişin arkasındaki temel nedenlerden biri, tüketicilerin sağlık ve zindelik konularına artan ilgisidir. Fonksiyonel gıdalar, bireylerin özel beslenme ihtiyaçlarına cevap verebilecek şekilde biyoaktif bileşenlerle zenginleştirilmektedir (Das vd., 2009). Nanopartiküller sayesinde gıdalara daha küçük miktarda biyoaktif bileşen eklenerek istenilen sağlık etkisine ulaşılabilir ve bu durum maliyet etkinliğini de artırır (Sozer ve Kokini, 2009). Ancak nanoteknolojinin hızla gelişmesi, bilimsel topluluk ve kamuoyunda güvenlik ve etik konularına dair endişeleri de beraberinde getirmiştir. Özellikle, nanopartiküllerin insan sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerinin tam olarak bilinmemesi, daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır (Bouwmeester vd., 2009). Bununla birlikte, Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri gibi büyük pazarlarda gıda ürünlerinde kullanılan nanomalzemelerin düzenleyici çerçevelerle kontrol altına alınması, bu teknolojinin güvenli kullanımını sağlamak adına kritik bir adımdır.

2. Nanopartiküllerin Fonksiyonel Gıdalarda Kullanım Potansiyeli

Nanopartiküllerin gıda bilimine entegrasyonu, fonksiyonel gıdaların sağlık üzerindeki etkisini daha etkili kılacak çok çeşitli uygulamaları kapsamaktadır. Özellikle, biyoaktif bileşenlerin korunması, biyoyararlanımlarının artırılması ve hedefe yönelik kontrollü salınım sistemleri, bu teknolojiyle mümkün hale gelmiştir. Nanoteknoloji sayesinde

belirli besin maddelerinin biyokimyasal stabilitesi korunurken, insan vücudu tarafından daha verimli bir şekilde emilim sağlanabilmektedir (Sekhon, 2010; Sozer ve Kokini, 2009).

2.1. Gıda Bileşenlerinin Fonksiyonel Etkilerini Artırmada Nanopartiküller

Nanopartiküller, gıda bileşenlerinin fonksiyonel etkilerini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Vitaminler, mineraller, probiyotikler ve polifenoller gibi biyoaktif bileşenlerin stabilitesi, nanokapsülasyon ve nanoemülsiyon teknolojileri sayesinde korunabilmekte ve bu sayede etkinlikleri artırılmaktadır (Singh, 2016). Örneğin, yağda çözünen vitaminlerin su bazlı sistemlere etkili bir şekilde eklenmesi nanoteknolojinin sunduğu çözümlerden biridir (He ve Hwang, 2016). Bu durum, geleneksel yöntemlere göre daha az biyoaktif madde kullanımıyla aynı fonksiyonel faydanın sağlanmasına olanak tanır.

Özellikle, polifenoller gibi oksidasyona karşı hassas bileşenlerin nanokapsüllerle korunması hem fonksiyonel etkinliği artırır hem de uzun raf ömrü sağlar. Omega-3 yağ asitleri içeren fonksiyonel gıdalarda kullanılan nanoteknoloji uygulamaları, bu yağların oksidatif bozulmasını önler ve biyoaktifliğini uzun süre koruyarak sağlık faydalarını sürdürür (Sekhon, 2010).

2.2. Nanotaşıyıcı Sistemler: Besin Biyoyararlanımını Artırma

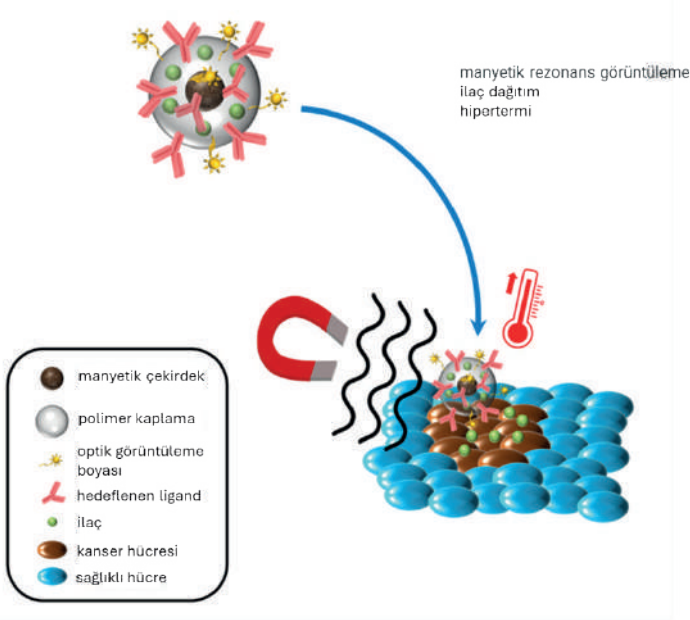
Biyoaktif bileşenlerin biyoyararlanımı, sindirim sistemi boyunca karşılaştıkları enzimatik ve pH değişimlerinden etkilenebilir. Nanotaşıyıcı sistemler, bu tür bileşenlerin gastrointestinal sistemde parçalanmadan hedef bölgeye ulaşmasını sağlar ve emilimini artırır (Bouwmeester vd., 2009). Nanokapsüller, nanoemülsiyonlar ve lipit bazlı taşıyıcı sistemler, özellikle zayıf çözünürlüğe sahip bileşiklerin biyoyararlanımını artırmada etkilidir (Das vd., 2009).

Bu tür taşıyıcı sistemlerin etkisi en çok vitaminler ve antioksidanlar gibi bileşenlerde görülmektedir. Örneğin, C vitamini ve likopen gibi biyoaktiflerin nanokapsüller içinde stabil tutulması, bu bileşiklerin ince bağırsakta emilimini artırır ve biyoyararlanımda önemli kazanımlar sağlar (Shah vd., 2024). Ayrıca, probiyotik mikroorganizmaların nanotaşıyıcılarla korunması, mide asidi gibi olumsuz ortamlara karşı dayanıklılığı artırarak bu mikroorganizmaların etkili olmasını sağlar (He ve Hwang, 2016).

2.3. Kontrollü Salınım ve Hedefe Yönelik Besin Dağıtımı

Nanoteknolojinin en önemli avantajlarından biri, gıda bileşenlerinin kontrollü salınımını ve hedefe yönelik taşınmasını sağlayan sistemler sunmasıdır. Bu sistemler, biyoaktif bileşenlerin belirli bir süre veya belirli bir vücut bölgesine salınmasını kontrol ederek etkinliklerini optimize eder (Sozer ve Kokini, 2009). Örneğin, kan şekerini düzenleyen biyoaktif bileşenlerin kontrollü salınımı, ani kan şekeri dalgalanmalarını önleyebilir ve metabolik fayda sağlayabilir (Singh, 2016). Kemoterapinin başlıca dezavantajlarından biri, antikanser ilaçlarının çoğunun seçici olmamasıdır, yani yalnızca kötü huylu hücreleri değil aynı zamanda sağlıklı hücreleri de öldürebilirler (Yavuz vd., 2018). Bu nedenle, araştırmacılar ilacın vücudun geri kalanı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltarak ilaç moleküllerini hedef bölgeye taşımak için çeşitli ilaç dağıtım sistemlerini geliştirmektedirler (Ailincai vd., 2018; Cetin ve Denizli, 2015; Çetin vd., 2017; Sadhukha vd., 2018). Manyetik nanopartiküller (MNP) hedef-spesifik ilaç taşıyıcıları olarak umut vadeden adaylardır. Bu nedenle, antineoplastik ajanları tümör bölgesine taşıyabilir ve sağlıklı dokuların etkilenmemesine yardımcı olabilirler. Dahası, MNP'ler terapötik ajanın lokal uygulanmasına yol açabildiğinden, kullanılan ilacın hacmi azalır ve ilaçların yan etkilerinde azalmaya yol açar. MNP'ler yalnızca antineoplastik ajanların değil, aynı zamanda antikorlar, peptitler, proteinler, genler vb. dahil olmak üzere diğer terapötik ajanların dağıtımında kullanılır (Şekil 1).

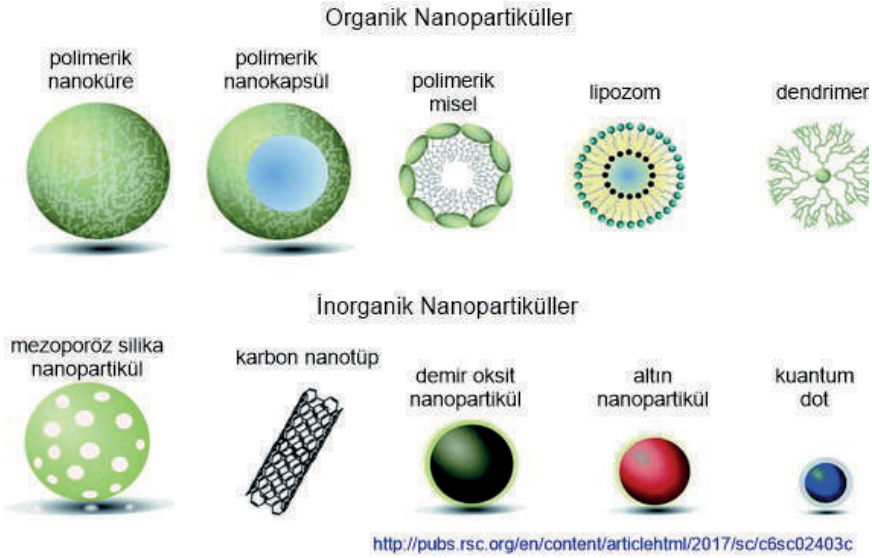
Hedefe yönelik besin dağıtımında, nanopartiküller, belirli dokular veya organlara besin maddelerini yönlendirebilen sofistike taşıyıcı sistemler olarak çalışır. Bu, özellikle kronik hastalıkları yönetmek amacıyla belirli bölgelerde aktif olması gereken bileşenler için büyük bir potansiyel sunar (Das vd., 2009). Örneğin, probiyotiklerin kolon bölgesinde salınmasını sağlayan nanotaşıyıcılar, bağırsak sağlığını doğrudan destekleyen kontrollü etkiler sunar (Silvestre vd., 2011).



Şekil 1. MNP'ler manyetik rezonans görüntüleme, ilaç iletimi ve hipertermi için iyi adaylardır (Çetin vd., 2019).

3. Fonksiyonel Gıdalarda Kullanılan Temel Nanomateryal Türleri

Fonksiyonel gıda uygulamalarında kullanılan nanomateryaller, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu nanomateryaller, besin bileşenlerinin taşınmasından biyoyararlanımlarının artırılmasına ve kontrollü salınımlarına kadar geniş bir yelpazede uygulamalara sahiptir. Şekil 2 de biyomedikal uygulamalarda kullanılan farklı nanopartikül tipleri verilmiştir. Her bir nanomateryal türü, farklı işlevsellikler sunarak gıda teknolojisinin farklı ihtiyaçlarına yanıt verir (Weiss vd., 2006).



Şekil 2. Biyomedikal uygulamalarda kullanılan farklı nanopartikül tipleri (Richards vd., 2017).

3.1. Lipid Bazlı Nanopartiküller

Lipid bazlı nanopartiküller, özellikle yağda çözünen biyoaktif bileşiklerin kapsüllenmesinde yaygın olarak kullanılan nanotaşıyıcılardır. Bunlar, nanoemülsiyonlar, katı lipid nanopartiküller (SLN) ve nanoyapılı lipid taşıyıcılar (NLC) gibi alt sınıflara ayrılır (García-Pinel vd., 2019). Nanoemülsiyonlar, küçük damlacık boyutları sayesinde aktif bileşenlerin biyoyararlanımını artırır ve oksidatif bozulmaya karşı koruma sağlar. Örneğin, omega-3 yağ asitleri ve vitamin E gibi yağda çözünen besin maddeleri, bu teknoloji sayesinde stabil halde taşınarak besinlerde etkili şekilde kullanılabilir (Puri vd., 2009).

SLN ve NLC'ler ise aktif bileşenlerin kontrollü salınımını sağlayarak uzun süreli etki yaratır. Özellikle antioksidanlar ve fenolik bileşiklerin korunması ve taşınmasında bu sistemler oldukça etkilidir (Samimi vd., 2019).

3.2. Protein ve Polimer Tabanlı Nanopartiküller

Protein ve polimer bazlı nanopartiküller, biyolojik olarak parçalanabilir ve toksik olmayan özelliklere sahip olmaları nedeniyle gıda uygulamalarında büyük ilgi görmektedir. Bu tür nanotaşıyıcılar, gıda bileşenlerinin kontrollü salınımını sağlarken çevresel etkilere karşı da yüksek stabilite sunar (DeFrates vd., 2018).

Protein bazlı nanopartiküller arasında kazein ve soya proteinleri gibi doğal proteinler ön plana çıkar. Bu proteinler, su ve yağda çözünen bileşiklerin stabilitesini artırabilir ve emilimini destekler (Haque ve Patra, 2023). Polimer bazlı nanopartiküller ise doğal veya sentetik olabilir. Örneğin, kitosan ve alginat gibi doğal polimerler biyoyoumlu olup, biyoaktif bileşenlerin mide asidine dayanıklı bir şekilde taşınmasını sağlar. Sentetik polimerler arasında ise poli(laktik-ko-glikolik asit) (PLGA) gibi polimerler, kontrollü salınım uygulamalarında kullanılır (Danhier vd., 2012).

3.3. Metal ve Metal Oksit Nanopartikülleri

Metal ve metal oksit nanopartikülleri, özellikle antimikrobiyal özellikleri ile dikkat çekmektedir. Gümüş (Ag), titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi nanopartiküller, gıda ürünlerinde mikroorganizmaların büyümesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır (Gold vd., 2018). Bu nanopartiküller, gıda paketlenme ve koruma sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.

Örneğin, ZnO nanopartikülleri hem UV koruması sağlar hem de bakteri gelişimini önleyerek gıda güvenliğini artırır. Bununla birlikte, metal nanopartiküllerin sağlık üzerindeki uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılmadığından bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Mohd Yusof vd., 2019).

3.4. Karbon Nanotüpleri ve Grafen Türevi Nanomalzemeler

Karbon nanotüpleri (CNT'ler) ve grafen türevi nanomalzemeler, güçlü mekanik özellikleri ve yüksek yüzey alanları ile dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde gıda ambalajlarında ve sensör teknolojilerinde kullanılmaktadır. Grafen oksit kaplamalar, gaz geçirmez özellikler sunarak gıdaların raf ömrünü uzatabilir ve dış ortamdan kaynaklanan olumsuz etkileri minimize edebilir (Barra vd., 2020).

Bunun yanında, CNT'ler, antimikrobiyal özellikleri sayesinde gıda güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, karbon bazlı nanomalzemelerin toksikolojik etkileriyle ilgili araştırmalar devam etmekte olup, bu teknolojinin güvenli kullanımını sağlamak adına daha fazla düzenleme ve denetim mekanizması gereklidir (Zhang vd., 2014).

4. Nanopartiküllerin Kullanımına Yönelik Zorluklar

Nanoteknolojinin gıda bilimindeki hızlı yükselişi, besinlerin etkinliğini artıran pek çok avantaj sağlasa da bu teknolojinin yaygın uygulamalarını sınırlayan önemli zorluklar bulunmaktadır. Nanopartiküllerin gıda

ürünlerinde kullanılmasına yönelik zorluklar üç ana başlık altında incelenebilir: toksikolojik ve sağlık üzerindeki etkiler, düzenleyici ve hukuki engeller ile tüketici kabulü ve sosyal algı. Bu zorlukların üstesinden gelinmesi, teknolojinin sürdürülebilir gelişimi ve güvenli kullanımı açısından hayati öneme sahiptir (Chaudhry ve Castle, 2011).

4.1. Toksikoloji ve Sağlık Üzerindeki Etkiler

Nanopartiküllerin sağlık üzerindeki etkileri, nanoteknolojiyle ilgili en büyük tartışma konularından biridir. Geleneksel malzemelere göre daha küçük boyutlarda olmaları, hücre zarlarını geçme ve biyolojik sistemlere nüfuz etme potansiyellerini artırır (Handy ve Shaw, 2007). Bu durum, nanopartiküllerin insan vücudunda istenmeyen toksik etkiler yaratma riskini de beraberinde getirebilir. Özellikle metal ve metal oksit nanopartiküllerinin uzun süreli kullanımda potansiyel oksidatif stres, hücresel DNA hasarı ve enflamatuvar tepkilere yol açabileceği öne sürülmektedir (Hardy vd., 2018).

Nanopartiküllerin bağırsak mikrobiyotasını nasıl etkilediği ve bu etkinin metabolik sağlık üzerindeki sonuçları gibi konular henüz tam olarak aydınlatılamamıştır (He ve Hwang, 2016). Bu nedenle, nanopartiküllerin güvenli kullanımını sağlamak için kapsamlı toksikolojik testlere ve uzun vadeli etkilerin değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2. Düzenleyici ve Hukuki Engeller

Nanoteknolojinin gıda sektöründeki uygulamaları, yasal düzenlemeler ve standartların eksikliği nedeniyle sınırlandırılmaktadır (Sandoval, 2009). Dünyanın farklı bölgelerinde nanoteknolojik ürünlerin güvenliği ve kullanımına yönelik düzenleyici çerçeveler farklılık göstermektedir. Avrupa Birliği (AB), gıda ürünlerinde nanomalzemelerin kullanımına dair katı düzenlemelere sahiptir ve bu malzemelerin piyasaya sürülmeden önce ayrıntılı güvenlik değerlendirmelerinden geçmesini şart koşmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bu konudaki düzenlemeler nispeten daha esnek, ancak FDA (Food and Drug Administration) bu teknolojiyi denetleme yetkisine sahiptir (Amenta vd., 2015).

Düzenleyici engellerin temel nedeni, nanopartiküllerin geleneksel kimyasallardan farklı olarak vücutta nasıl davrandığının tam anlamıyla bilinmemesidir (Coles ve Frewer, 2013). Bu nedenle, hem uluslararası standartların uyumlaştırılması hem de gıda güvenliği açısından daha kapsamlı protokollerin geliştirilmesi gerekmektedir.

4.3. Tüketici Kabulü ve Sosyal Algı

Tüketici algısı ve kabulü, nanoteknoloji tabanlı gıdaların pazardaki başarısını doğrudan etkileyen faktörlerden biridir. Tüketicilerin büyük bir kısmı, nanoteknolojinin potansiyel sağlık riskleri konusundaki belirsizlikler nedeniyle bu tür ürünlere mesafeli yaklaşmaktadır (McCarron, 2016). Yapılan çalışmalar, tüketicilerin nanoteknolojiyle ilgili riskleri algılamakta gıdalarda kullanılan nanomalzemelerin kimyasal bileşimlerini ve işlevlerini göz önünde bulundurdıklarını göstermektedir.

Bu noktada, güven inşa etmek amacıyla etkili iletişim stratejilerinin geliştirilmesi önemlidir. Bilimsel verilerin şeffaf bir şekilde sunulması ve nanopartiküllerin gıda güvenliğine katkı sağlayan avantajlarının vurgulanması, tüketici kabulünü artırabilir (Siegrist vd., 2009). Ayrıca, kamuoyunun bilinçlendirilmesine yönelik eğitim programları ve medya kampanyaları, nanoteknolojinin yanlış anlaşılmasını önlemede kritik bir rol oynayabilir.

5. Risk Değerlendirme ve Güvenlik Standartları

Nanoteknolojinin gıda bilimindeki ilerlemesi, bu teknolojinin güvenli kullanımını sağlamak amacıyla etkili risk değerlendirme protokollerine ve güvenlik standartlarına ihtiyaç duymaktadır. Nanopartiküller, biyolojik sistemlerde geleneksel materyallere göre farklı davranışlar sergileyebildiğinden, bu materyallerin risklerinin değerlendirilmesi, düzenleyici çerçeveler ve gelişmiş izleme teknikleriyle bütünleşmiş bir şekilde ele alınmalıdır (Bouwmeester vd., 2014; Grobe vd., 2008).

5.1. Nanogıda Güvenliğinde Mevcut Yönetmelikler

Dünyada nanogıda güvenliğini düzenleyen yönetmelikler, farklı bölgelerde değişiklik göstermektedir. Avrupa Birliği (AB) bu konuda en katı yönetmeliklere sahip olup, 2011 yılından itibaren nanomalzemelerin etiketlenmesini zorunlu hale getirmiştir (Chau vd., 2007). Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), gıda ürünlerinde kullanılan nanomalzemelerin ayrıntılı risk değerlendirmelerinden geçirilmesini şart koşar. EFSA'nın belirlediği kurallar, nanopartiküllerin toksisite, biyoyararlanım, biyobirikim ve çevresel etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini içerir (Committee, 2011; Committee vd., 2018).

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise gıda ürünleri üzerindeki düzenleyici denetim Food and Drug Administration (FDA) tarafından yürütülmektedir. Ancak ABD'de nanoteknolojinin düzenlenmesi, AB'ye göre daha esnektir ve nanomalzemelerin ayrı bir kategori olarak değerlendirilmesine gerek

duyulmayabilir (Amenta vd., 2015). Diğer yandan, Japonya ve Avustralya gibi ülkelerde de benzer düzenleyici protokoller oluşturulmuş olup, bu düzenlemeler genellikle nanomalzemelerin potansiyel toksik etkilerini değerlendirir.

5.2. Risk Analizi ve Metodolojiler

Nanoteknolojik ürünlerin risk analizinde kullanılan metodolojiler, kimyasal ve biyolojik etkilerin çok yönlü olarak incelenmesini kapsar. EFSA ve FDA gibi kuruluşlar, risk analizinde üç temel aşamayı benimsemektedir: tehlike tanımlama, maruziyet değerlendirmesi ve risk karakterizasyonu (Committee, 2011; Committee vd., 2018). Bu aşamalar, nanomalzemelerin gıdalardaki davranışlarını, biyoyararlanımlarını ve vücutta birikim potansiyellerini dikkate alır.

Tehlike tanımlama sürecinde, nanopartiküllerin olası toksik etkileri belirlenir. Bu aşamada hücre kültürü çalışmaları ve hayvan deneyleri yaygın olarak kullanılır (Chaudhry ve Groves, 2010). Maruziyet değerlendirmesi, nanopartiküllerin tüketim yoluyla vücuda alınan miktarlarını ve bu miktarların biyolojik sistemlerdeki etkilerini analiz eder. Son olarak, risk karakterizasyonu, olası sağlık etkilerinin kapsamını ve ciddiyetini değerlendirerek güvenlik sınırlarını belirler (Takeuchi vd., 2014).

5.3. Nanopartikül Tespiti ve İzleme Teknikleri

Nanopartiküllerin tespit edilmesi ve izlenmesi, güvenlik değerlendirmelerinin doğru ve etkin bir şekilde yürütülebilmesi için kritik öneme sahiptir. Gıdalarda ve biyolojik sistemlerde nanopartiküllerin varlığını tespit etmek için gelişmiş analitik teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler, nanopartiküllerin boyutlarını, yüzey özelliklerini ve kimyasal bileşimlerini doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlar (Wasilewska vd., 2023). Başlıca kullanılan teknikler şunlardır: Elektron Mikroskopisi (SEM/TEM), Nanopartiküllerin morfolojisini ve boyut dağılımını belirlemede yaygın olarak kullanılan görüntüleme teknikleridir (Lim vd., 2015). Dinamik Işık Saçılımı (DLS), Nanoemülsiyonlar ve sıvı fazdaki nanopartiküllerin boyutlarını belirlemek için kullanılır. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Nanopartiküllerin yüzey özelliklerini ve topografisini incelemek amacıyla kullanılır. Kütle Spektrometresi (ICP-MS), Gıdalardaki metal bazlı nanopartiküllerin kimyasal bileşimlerini ve konsantrasyonlarını ölçmek için etkilidir (He vd., 2019; Tiede vd., 2008).

Bu tekniklerin yanı sıra, gelişmiş izleme sistemleri, üretim ve dağıtım süreçlerinde nanopartiküllerin güvenli kullanımını sağlamak için

uygulanmaktadır. Bu sayede, olası kontaminasyonların önlenmesi ve belirli güvenlik sınırlarının aşılmasının engellenmesi amaçlanır (Ravichandran, 2010).

6. Endüstriyel Uygulamalar

Nanoteknolojinin gıda sanayisindeki etkisi her geçen gün daha da artmakta ve bu alandaki yenilikler, daha fonksiyonel, güvenli ve sürdürülebilir gıda ürünlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Mevcut ürünlerin iyileştirilmesi ve yeni ürünlerin geliştirilmesinde nanoteknoloji hem kalite hem de verim açısından önemli bir rol oynar. Ayrıca, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği teşvik eden yeşil nanoteknoloji yaklaşımları, bu teknolojinin gelecekteki etkisini artıracaktır (Chellaram vd., 2014; Thiruvengadam vd., 2018).

6.1. Mevcut ve Gelişmekte Olan Ürünler

Nanoteknoloji, halihazırda çeşitli gıda ürünlerinde kullanılmakta olup bu ürünler, biyoaktif bileşenlerin etkili bir şekilde taşınmasını, raf ömrünün uzatılmasını ve gıda güvenliğinin artırılmasını hedeflemektedir (Rathore ve Pandey, 2024; Singh vd., 2024). Öne çıkan mevcut uygulamalardan bazıları şunlardır:

Nanoemülsiyon Bazlı İçecekler: Omega-3 yağ asitleri, vitaminler ve polifenoller gibi biyoaktif bileşenleri içeren içecekler, nanoemülsiyonlar sayesinde daha yüksek biyoyararlanım sunmaktadır. Örneğin, içecek sektöründe kullanılan bu teknoloji, biyoaktif bileşenlerin stabilitesini koruyarak sağlık faydalarını artırmaktadır (Kaur vd., 2024).

Nanoyapılı Ambalaj Malzemeleri: Gıda güvenliğini artıran ve mikrobiyal kontaminasyonu önleyen antimikrobiyal ambalajlar, gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmada kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle gümüş ve çinko oksit nanopartikülleri içeren ambalajlar yaygın olarak kullanılmaktadır (Chudasama ve Goyary, 2024).

Fonksiyonel Süt Ürünleri: Probiyotik içeren yoğurtlar ve süt ürünleri, nanopartiküller sayesinde probiyotiklerin mide asidine karşı korunmasını ve bağırsaklarda etkili olmasını sağlamaktadır (Salama vd., 2022).

Gelişmekte olan ürünler arasında, belirli hastalıklara yönelik besin maddeleri taşıyan akıllı gıdalar ve sindirim sistemine hedeflenmiş besin taşıyıcı sistemler yer almaktadır.

6.2. Nanoteknolojinin Fonksiyonel Gıda Ar-Ge'sine Etkisi

Nanoteknoloji, fonksiyonel gıda araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarına entegre edilerek besinlerin etkinliğini artıran birçok yeniliğe kapı açmıştır. Nanoteknolojinin sağladığı mikro düzeyde kontrol, biyoaktif bileşenlerin hassas bir şekilde işlenmesine olanak tanımakta ve yeni ürünlerin daha hızlı geliştirilmesini sağlamaktadır (Weiss vd., 2006).

Nanotaşıyıcı sistemler, besin bileşenlerinin hedefe yönelik taşınmasını ve kontrollü salınımını mümkün kılarak gıda Ar-Ge çalışmalarında büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu durum, özellikle sporcu gıdaları, yaşlı bireyler için yönelik besin takviyeleri ve kronik hastalıklara yönelik besin destek ürünlerinin geliştirilmesinde etkili olmuştur (Momin vd., 2013).

Ayrıca, nanoteknoloji sayesinde sürdürülebilir üretim metodlarının geliştirilmesi, gıda israfının azaltılmasına ve üretim süreçlerinin optimize edilmesine de katkı sunmaktadır.

6.3. Sürdürülebilir ve Yeşil Nanoteknoloji Yaklaşımları

Endüstriyel uygulamalarda sürdürülebilirlik ve çevre dostu çözümler, nanoteknoloji tabanlı üretim süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yeşil nanoteknoloji yaklaşımları, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur nanomalzemelerin kullanımıyla çevresel etkileri azaltmayı hedefler (Ravichandran, 2010). Bu yaklaşımlardan bazıları şunlardır:

Biyobozunur Nanomalzemeler: Kitosan, alginat ve nişasta gibi doğal polimerlerden elde edilen biyobozunur nanotaşıyıcı sistemler, geleneksel sentetik malzemelere kıyasla daha az çevresel etkiye sahiptir (Khan, 2020). Bu tür malzemeler, özellikle çevre dostu ambalaj sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Enerji Verimli Üretim: Nanoteknoloji sayesinde enerji tüketimini azaltan ve daha az atık oluşturan üretim süreçleri geliştirilmektedir. Bu uygulamalar, özellikle nanoemülsiyonların düşük enerji kullanılarak hazırlanması ve üretim süreçlerinde su tüketiminin minimize edilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır (Pandey, 2018).

Atık Yönetimi ve Dönüşüm: Gıda üretimi sırasında ortaya çıkan atıkların, nanoteknoloji aracılığıyla geri dönüştürülmesi ve biyoaktif bileşenlerin geri kazanılması üzerine yapılan çalışmalar da sürdürülebilirliği teşvik etmektedir (Rathod vd., 2024).

Bu yaklaşımlar, yalnızca çevre dostu üretimi desteklemekle kalmaz, aynı zamanda maliyet etkin çözümler sunarak uzun vadede endüstriyel kârlılığı da artırır.

7. Sonuçlar ve Öneriler

Fonksiyonel gıdalarda nanoteknoloji kullanımı, besinlerin biyoyararlanımını artırmaktan gıda güvenliğini iyileştirmeye kadar geniş bir uygulama alanı sunarak gıda bilimi ve endüstrisinde devrim niteliğinde değişiklikler yaratmıştır. Ancak, bu teknolojinin uzun vadeli sağlık etkileri, yasal düzenlemeler ve tüketici kabulü gibi zorluklar, dikkatle ele alınması gereken kritik konular arasında yer almaktadır. Bu nedenle, gelecekteki çalışmalar ve politika yapıcılarının desteği, güvenli ve sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi açısından önemli olacaktır. Nanoteknoloji, gıda biliminde inovatif çözümler sunarak biyoaktif bileşenlerin hedefe yönelik taşınması, stabilitenin korunması ve kontrollü salınım gibi avantajlarla gıdaların besin değerini artırmıştır. Bu teknolojinin, omega-3 yağ asitleri, polifenoller, probiyotikler ve vitaminler gibi biyoaktif bileşenlerin etkin kullanımını kolaylaştırması, fonksiyonel gıda pazarında hızlı bir büyümeye neden olmuştur.

Bununla birlikte, metal ve metal oksit nanopartiküllerinin uzun vadeli toksik etkileri gibi önemli konular henüz tam anlamıyla aydınlatılamamıştır. Düzenleyici çerçevelerin uluslararası düzeyde uyumlaştırılması ve gıda ürünlerinde nanomalzemelerin etiketlenmesinin şeffaf bir şekilde yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda, sürdürülebilir ve çevre dostu nanoteknolojik çözümlerle gıda üretiminde enerji verimliliğinin artırılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından büyük önem taşır.

Nanoteknolojinin fonksiyonel gıdalardaki potansiyelini tam anlamıyla ortaya çıkarabilmek ve güvenli kullanımını sağlamak için çeşitli araştırma alanlarına odaklanılması gerekmektedir. Bu bağlamda gelecekteki araştırmalarda aşağıdaki konulara öncelik verilmesi önerilmektedir:

Toksikolojik Çalışmalar: Nanopartiküllerin uzun vadeli sağlık etkilerini değerlendiren *in vivo* ve *in vitro* çalışmaların artırılması önemlidir. Özellikle nanopartiküllerin bağışıklık sistemi, bağırsak mikrobiyotası ve hücresel DNA üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Daha Güvenli Nanomalzemeler: Toksik etkileri minimum düzeye indiren ve biyobozunur özelliklere sahip yeni nesil nanomalzemelerin geliştirilmesi sürdürülebilir üretim açısından önemli bir adım olacaktır.

Yeşil Nanoteknoloji Yaklaşımları: Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur nanotaşıyıcı sistemler, çevresel sürdürülebilirliği destekleyerek çevre dostu çözümlerin benimsenmesini teşvik edebilir.

Düzenleyici Çerçevelerin Geliştirilmesi: Ulusal ve uluslararası düzeyde nanomalzemelerin kullanımına yönelik standartların belirlenmesi ve bu standartların bilimsel bulgulara dayalı olarak güncellenmesi gerekmektedir.

Tüketici Eğitimi ve Sosyal Algı: Tüketicilerin nanoteknolojiye yönelik güvenini artırmak için şeffaf bilgilendirme ve farkındalık kampanyaları düzenlenmelidir. Bilimsel verilerin kamuoyuna açık şekilde sunulması, toplumda yanlış anlaşılımları ve olumsuz algıyı azaltabilir.

Sonuç olarak, fonksiyonel gıdalarda nanoteknolojinin güvenli ve sürdürülebilir gelişimi için disiplinler arası iş birliği ve kapsamlı bilimsel araştırmalar hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda, akademi, endüstri ve düzenleyici kuruluşların ortak hareket etmesi, inovasyon ve güvenlik dengesinin sağlanmasına yardımcı olacaktır.

Kaynakça

- Ailincăi, D., Mititelu, L. T., ve Marin, L. (2018). Drug delivery systems based on biocompatible imino-chitosan hydrogels for local anticancer therapy. *Drug Delivery*, 25(1), 1080-1090.
- Amenta, V., Aschberger, K., Arena, M., Bouwmeester, H., Moniz, F. B., Brandhoff, P., Gottardo, S., Marvin, H. J., Mech, A., ve Pesudo, L. Q. (2015). Regulatory aspects of nanotechnology in the agri/feed/food sector in EU and non-EU countries. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 463-476.
- Barra, A., Santos, J. D., Silva, M. R., Nunes, C., Ruiz-Hitzky, E., Gonçalves, I., Yildirim, S., Ferreira, P., ve Marques, P. A. (2020). Graphene derivatives in biopolymer-based composites for food packaging applications. *Nanomaterials*, 10(10), 2077.
- Bouwmeester, H., Brandhoff, P., Marvin, H. J., Weigel, S., ve Peters, R. J. (2014). State of the safety assessment and current use of nanomaterials in food and food production. *Trends in Food Science ve Technology*, 40(2), 200-210.
- Bouwmeester, H., Dekkers, S., Noordam, M. Y., Hagens, W. I., Bulder, A. S., de Heer, C., ten Voorde, S. E. C. G., Wijnhoven, S. W. P., Marvin, H. J. P., ve Sips, A. J. A. M. (2009). Review of health safety aspects of nanotechnologies in food production. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 53(1), 52-62.
- Cetin, K., ve Denizli, A. (2015). 5-Fluorouracil delivery from metal-ion mediated molecularly imprinted cryogel discs. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 126, 401-406.
- Chau, C.-F., Wu, S.-H., ve Yen, G.-C. (2007). The development of regulations for food nanotechnology. *Trends in Food Science ve Technology*, 18(5), 269-280.
- Chaudhry, Q., ve Castle, L. (2011). Food applications of nanotechnologies: an overview of opportunities and challenges for developing countries. *Trends in Food Science ve Technology*, 22(11), 595-603.
- Chaudhry, Q., ve Groves, K. (2010). Nanotechnology applications for food ingredients, additives and supplements.
- Chellaram, C., Murugaboopathi, G., John, A., Sivakumar, R., Ganesan, S., Krithika, S., ve Priya, G. (2014). Significance of nanotechnology in food industry. *APCBEE procedia*, 8, 109-113.
- Chudasama, M., ve Goyary, J. (2024). Nanostructured materials in food science: Current progress and future prospects. *Next Materials*, 100206.
- Coles, D., ve Frewer, L. J. (2013). Nanotechnology applied to European food production—A review of ethical and regulatory issues. *Trends in Food Science ve Technology*, 34(1), 32-43.

- Committee, E. S. (2011). Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain. *EFSA journal*, 9(5), 2140.
- Committee, E. S., Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, H. K., More, S., Naegeli, H., Noteborn, H., ve Ockleford, C. (2018). Guidance on risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA journal*, 16(7), e05327.
- Çetin, K., Alkan, H., Bereli, N., ve Denizli, A. (2017). Molecularly imprinted cryogel as a pH-responsive delivery system for doxorubicin. *Journal of Macromolecular Science Part a-Pure and Applied Chemistry*, 54(8), 502-508.
- Çetin, K., Denizli, F., Yavuz, H., Türkmen, D., Qureshi, T., ve Denizli, A. (2019). Magnetic nanoparticles and their biomedical applications. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 47(2), 143-152.
- Danhier, F., Ansorena, E., Silva, J. M., Coco, R., Le Breton, A., ve Préat, V. (2012). PLGA-based nanoparticles: an overview of biomedical applications. *Journal of controlled release*, 161(2), 505-522.
- Das, M., Saxena, N., ve Dwivedi, P. D. (2009). Emerging trends of nanoparticles application in food technology: Safety paradigms. *Nanotoxicology*, 3(1), 10-18.
- DeFrates, K., Markiewicz, T., Gallo, P., Rack, A., Weyhmiller, A., Jarmusik, B., ve Hu, X. (2018). Protein polymer-based nanoparticles: fabrication and medical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(6), 1717.
- García-Pinel, B., Porras-Alcalá, C., Ortega-Rodríguez, A., Sarabia, F., Prados, J., Melguizo, C., ve López-Romero, J. M. (2019). Lipid-based nanoparticles: application and recent advances in cancer treatment. *Nanomaterials*, 9(4), 638.
- Gold, K., Slay, B., Knackstedt, M., ve Gaharwar, A. K. (2018). Antimicrobial activity of metal and metal-oxide based nanoparticles. *Advanced Therapeutics*, 1(3), 1700033.
- Grobe, A., Renn, O., ve Jaeger, A. (2008). *Risk governance of nanotechnology applications in food and cosmetics*.
- Handy, R. D., ve Shaw, B. J. (2007). Toxic effects of nanoparticles and nanomaterials: implications for public health, risk assessment and the public perception of nanotechnology. *Health, Risk ve Society*, 9(2), 125-144.
- Haque, S., ve Patra, C. R. (2023). Casein-based nanosystems for therapeutic applications. In *Polymeric Nanosystems* (pp. 621-655). Elsevier.
- Hardy, A., Benford, D., Halldorsson, T., Jeger, M. J., Knutsen, H. K., More, S., Naegeli, H., Noteborn, H., ve Ockleford, C. (2018). Guidance on risk

- assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain: Part 1, human and animal health. *EFSA journal*, 16(7), e05327.
- He, X., Deng, H., ve Hwang, H.-m. (2019). The current application of nanotechnology in food and agriculture. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27(1), 1-21.
- He, X., ve Hwang, H.-M. (2016). Nanotechnology in food science: Functionality, applicability, and safety assessment. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(4), 671-681.
- Kaur, G., Panigrahi, C., Agarwal, S., Khuntia, A., ve Sahoo, M. (2024). Recent trends and advancements in nanoemulsions: Production methods, functional properties, applications in food sector, safety and toxicological effects. *Food Physics*, 100024.
- Khan, S. H. (2020). Green nanotechnology for the environment and sustainable development. *Green materials for wastewater treatment*, 13-46.
- Lim, J.-H., Sisco, P., Mudalige, T. K., Sanchez-Pomales, G., Howard, P. C., ve Linder, S. W. (2015). Detection and characterization of SiO₂ and TiO₂ nanostructures in dietary supplements. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(12), 3144-3152.
- McCarron, E. (2016). *Nanotechnology and food: investigating consumers' acceptance of foods produced using nanotechnology* [Dublin Business School].
- Mohd Yusof, H., Mohamad, R., Zaidan, U. H., ve Abdul Rahman, N. A. (2019). Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *Journal of animal science and biotechnology*, 10, 1-22.
- Momin, J. K., Jayakumar, C., ve Prajapati, J. B. (2013). Potential of nanotechnology in functional foods. *Emirates journal of food and agriculture*, 25(1), 10-19.
- Pandey, G. (2018). Nanotechnology for achieving green-economy through sustainable energy. *Rasayan J Chem*, 11(3), 942-950.
- Puri, A., Loomis, K., Smith, B., Lee, J.-H., Yavlovich, A., Heldman, E., ve Blumenthal, R. (2009). Lipid-based nanoparticles as pharmaceutical drug carriers: from concepts to clinic. *Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 26(6).
- Rathod, S., Preetam, S., Pandey, C., ve Bera, S. P. (2024). Exploring synthesis and applications of green nanoparticles and the role of nanotechnology in wastewater treatment. *Biotechnology Reports*, e00830.
- Rathore, S., ve Pandey, A. K. (2024). Applications of Nanotechnology in Food Processing. In *Advanced Research Methods in Food Processing Technologies* (pp. 401-417). Apple Academic Press.

- Ravichandran, R. (2010). Nanotechnology applications in food and food processing: innovative green approaches, opportunities and uncertainties for global market. *International Journal of Green Nanotechnology: Physics and Chemistry*, 1(2), P72-P96.
- Richards, D. A., Maruani, A., ve Chudasama, V. (2017). Antibody fragments as nanoparticle targeting ligands: a step in the right direction. *Chemical Science*, 8(1), 63-77.
- Sadhukha, T., Layek, B., ve Prabha, S. (2018). Incorporation of lipolysis in monolayer permeability studies of lipid-based oral drug delivery systems. *Drug Delivery and Translational Research*, 8(2), 375-386.
- Salama, H. H., Trif, M., Rusu, A. V., ve Bhattacharya, S. (2022). Application of functional and edible coatings and films as promising strategies for developing dairy functional products—A review on yoghurt case. *Coatings*, 12(6), 838.
- Samimi, S., Maghsoudnia, N., Eftekhari, R. B., ve Dorkoosh, F. (2019). Lipid-based nanoparticles for drug delivery systems. *Characterization and biology of nanomaterials for drug delivery*, 47-76.
- Sandoval, B. (2009). Perspectives on FDA's regulation of nanotechnology: emerging challenges and potential solutions. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8(4), 375-393.
- Sekhon, B. S. (2010). Food nanotechnology - an overview. *Nanotechnology Science and Applications*, 3, 1-15.
- Shah, M. A., Shahnaz, T., Zehab-ud-Din, Masoodi, J. H., Nazir, S., Qurashi, A., ve Ahmed, G. H. (2024). Application of nanotechnology in the agricultural and food processing industries: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 39.
- Siegrist, M., Stampfli, N., ve Kastenholz, H. (2009). Acceptance of nanotechnology foods: a conjoint study examining consumers' willingness to buy. *British Food Journal*, 111(7), 660-668.
- Silvestre, C., Duraccio, D., ve Cimmino, S. (2011). Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progress in Polymer Science*, 36(12), 1766-1782.
- Singh, A., Figueiredo, R., Avagyan, A. A., Movsesyan, H. S., Rajput, V. D., Minkina, T. M., Singh, R. K., Sousa, J. R., ve Ghazaryan, K. (2024). Market Value of Nanotechnology-Based Products in Agriculture: Current Status and Future Sustainability Goals in the Era of Climate Change.
- Singh, H. (2016). Nanotechnology Applications in Functional Foods; Opportunities and Challenges. *Prev Nutr Food Sci*, 21(1), 1-8.
- Sozer, N., ve Kokini, J. L. (2009). Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends in Biotechnology*, 27(2), 82-89.
- Takeuchi, M. T., Kojima, M., ve Luetzow, M. (2014). State of the art on the initiatives and activities relevant to risk assessment and risk management

- of nanotechnologies in the food and agriculture sectors. *Food Research International*, 64, 976-981.
- Thiruvengadam, M., Rajakumar, G., ve Chung, I.-M. (2018). Nanotechnology: current uses and future applications in the food industry. *3 Biotech*, 8, 1-13.
- Tiede, K., Boxall, A. B., Tear, S. P., Lewis, J., David, H., ve Hassellöv, M. (2008). Detection and characterization of engineered nanoparticles in food and the environment. *Food Additives and Contaminants*, 25(7), 795-821.
- Wasilewska, A., Bielicka, M., Klekotka, U., ve Kalska-Szostko, B. (2023). Nanoparticle applications in food—a review. *Food ve Function*, 14(6), 2544-2567.
- Weiss, J., Takhistov, P., ve McClements, D. J. (2006). Functional materials in food nanotechnology. *Journal of Food Science*, 71(9), R107-R116.
- Yavuz, H., Çetin, K., Akgönüllü, S., Battal, D., ve Denizli, A. (2018). Therapeutic protein and drug imprinted nanostructures as controlled delivery tools. In *Design and Development of New Nanocarriers* (pp. 439-473). Elsevier.
- Zhang, Y., Petibone, D., Xu, Y., Mahmood, M., Karmakar, A., Casciano, D., Ali, S., ve Biris, A. S. (2014). Toxicity and efficacy of carbon nanotubes and graphene: the utility of carbon-based nanoparticles in nanomedicine. *Drug metabolism reviews*, 46(2), 232-246.

Fonksiyonel Gıdalar ve Biyoaktif Maddeler: Yenilikler ve Uygulamalar

Editör:

Hasan Ufuk Çelebioğlu