

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 *paraprobİYOTİK* 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 hücrel 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 süpernatanın 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 oluşturuç 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 xylosus*'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 Antiinflamatuvar 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 proinflamatuvar 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. Antiinflatuvar Etkileri

Enflamasyon, organizmanın enfeksiyona karşı ilk savunma yanıtıdır; ancak aşırı veya kronik inflamasyon, inflamatuvar bağırsak hastalığı (IBD), artrit, 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-para-biotics: 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.