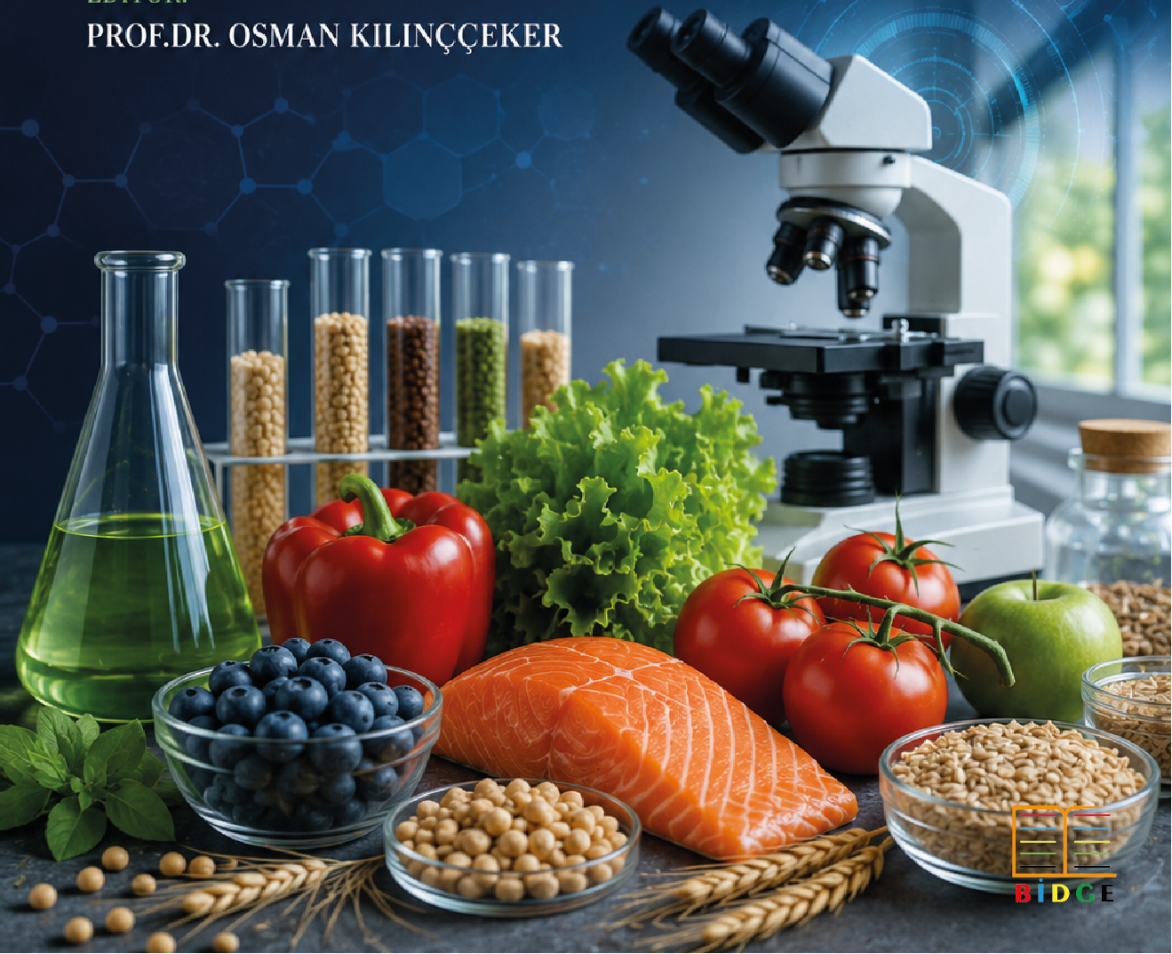


GIDA MÜHENDİSLİĞİ VE TEKNOLOJİSİNDE YENİ NESİL YAKLAŞIMLAR



EDİTÖR:

PROF.DR. OSMAN KILINÇÇEKER



BİDGE Yayınları

Gıda Mühendisliği ve Teknolojisinde Yeni Nesil Yaklaşımlar

Editör: OSMAN KILINÇÇEKER

ISBN: 978-625-8821-09-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-06-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

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

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



ÖN SÖZ

Dünya gıda üreticileri hem ham madde teminindeki zorluklar hem de bilinçli tüketici tercihlerindeki değişimler nedeniyle ürünlerinde değişime gitme ve alternatifler oluşturma çabasındadırlar. Ayrıca bu durumu çevresel ve iklim değişikliği gibi nedenler de etkilemektedir. Oluşan zorlukların üstesinden gelebilmek ve tüketici memnuniyetini sağlamanın yanı sıra, asıl hedefleri olan kar edebilmek adına, farklı kaynakları ve farklı prosesleri kullanarak avantaj sağlamaya çalışmaktadırlar. Bu doğrultuda konu ile ilgili çalışan bilim adamları da araştırmalarını bu yönde yoğunlaştırarak hem sektöre hem de tüketicilere istedikleri özelliklere sahip ürünler ve bu ürünlerin hazırlanmasında yardımcı malzemeler veya işlemler sunmaya uğraşmaktadırlar. Yapılan uygulamaların avantaj ve dezavantajlarından bahsederek bir yön çizmeye yardımcı olmaktadır. Kitabımızda bu husus göz önünde bulundurularak, alanlarında uzman farklı araştırmacıların güncel olan bazı konulardaki bilimsel metinlerine yer verilmiştir. Gıda sektöründeki farklı konulardan güncel bilgiler verilerek hem üretime hem de literatüre kaynak bir kitap oluşturulmak istenmiştir. Bu amaçla, kitabın hazırlanmasında değerli zamanlarını ayırarak bölüm metinlerinin oluşturulmasına katkı sağlayan tüm akademisyen arkadaşlara, ayrıca basımda yardımcı olan Bidge Yayın Evi ve çalışanlarına teşekkür eder, kitabımızın hem üreticilere hem de tüketicilere hayırlı olmasını temenni ederim.

Prof. Dr. Osman KILINÇÇEKER

Adıyaman Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

GIDA ENDÜSTRİSİNDE YAPAY ZEKA ENTEGRASYONU VE GIDA GÜVENLİĞİ, KALİTE KONTROL VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ	1

MUTLU BUKET AKIN, ÇAĞIM AKBULUT ÇAKIR

GIDA FERMENTASYONUNDA OMİK TEKNOLOJİLERİ: MİKROBİYOTA ANALİZLERİ METABOLOMİK YAKLAŞIMLAR VE MULTİ-OMİK ENTEGRASYON	52

TUĞBA KARABEKMEZ ERDEM, YEKTA GEZGİNÇ

MODİFİYE NİŞASTALAR: YAPISI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI	80

MUSTAFA SATOUF, MEHMET KÖTEN

TEK HÜCRE PROTEİNLERİ VE GIDA SEKTÖRÜNDE KULLANIM OLANAKLARI	141

ALİ MÜCAHİT KARAHAN, OSMAN KILINÇÇEKER

POSTBİYOTİKLERİN BAĞIRSAK-BEYİN EKSENİ ÜZERİNE ETKİLERİ	190

ELİF NAZ GÜRSEL, HATİCE AHU KAHRAMAN

ANTİDİYABETİK GIDALAR ÜZERİNE ÇALIŞMALAR ...	203

MURAT KAYA

GLUTEN: YAPISI, FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE SAĞLIK ETKİLERİ	219

MEHMET KÖTEN, ALİ MÜCAHİT KARAHAN

COĞRAFİ İŞARETLİ GASTRONOMİK ÜRÜNLERDE STANDARDİZASYON-OTANTİKLİK DENGESİ	270

HATİCE PEKMEZ

POPÜLER DİYET MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: METABOLİK VE ÇEVRESEL ÇIKTILARI	285

BEYZA KARAYİĞİT

İÇİNDEKİLER

ADLAY TAHILI (COIX LACRYMA-JOBİ L.): BESİN BİLEŞİMİ, İŞLEME TEKNOLOJİLERİ VE BİYOYARARLANIMI	348

MAHİR SERDAR YILMAZ

BÖLÜM 1

GIDA ENDÜSTRİSİNDE YAPAY ZEKA ENTEGRASYONU VE GIDA GÜVENLİĞİ, KALİTE KONTROL VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ

M. BUKET AKIN¹
ÇAĞIM AKBULUT ÇAKIR²

Giriş

Bugün endüstriyel üretim süreçlerinde gerçekleşmekte olan dijitalleşme ve yeşil dönüşüm girişimleri, gıda mühendisliği alanında da geleneksel yöntemlerden yenilikçi metodolojilere geçişi gerekli kılmaktadır. Bu anlamda, özellikle dinamik, çok değişkenli ve lineer olmayan proseslerin optimizasyonunda yapay zeka (YZ) ön plana çıkmaktadır. En temel tanımıyla YZ; insan zekasına özgü olan algılama, öğrenme, veri analizi yapma, muhakeme etme ve de karar verme gibi önemli bilişsel fonksiyonların bilgisayar tabanlı algoritmalara aktararak gerçekleştirilmesi sürecidir (Russell ve Norvig, 2020). YZ tabanlı sistemler gıda endüstrisinde gerçek zamanlı takip, tahmin, karar verme, proses optimizasyonu gibi alanlarda verimlilik sağlamak ve insan kaynaklı hataları önlemektedir (Dhal ve Kar, 2025). YZ gıda güvenliğinin sağlanmasında kontaminantların hızlı tespiti, mikrobiyal gelişim

¹ Prof. Dr., Harran Üniversitesi, Gıda Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-8307-8521

² Doç. Dr., Harran Üniversitesi, Gıda Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-2754-0133

tahmini ve tedarik zincirinin izlenebilirliğini sağlamaktadır (Lopez ve ark., 2026). Kalite kontrol uygulamaları olarak gıdaların fiziksel, kimyasal ve duyuşal özelliklerinin doğru şekilde tespiti ve değerlendirilmesinde yararlanılmaktadır (Uzunov ve Angeleska, 2026). Bunlara ek olarak YZ enerji tüketiminin optimizasyonu, gıda atıklarının azaltılması, tedarik zinciri lojistiğinin geliştirilmesi ve hassas üretim tekniklerini desteklemesi ile sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Yang ve ark., 2025). Dijital ikizler gibi yeni çıkan teknolojiler gıda proseslerinin görsel simülasyonu ile prediktif bakım onarım, proses optimizasyonu ve raf ömrü tahmini yapmayı sağlayabilmektedir (Abdurrahman ve Ferrari, 2025; Purlis, 2024). YZ uygulamalarının gıda endüstrisine entegrasyonunun başlıca motivasyonları özetle aşağıdaki maddelerle sıralanabilir:

1. Üretimde Verimlilik ve Sürdürülebilirlik: Endüstriyel üretimde açığa çıkan yan ürünlerin (örneğin zeytin karasuyu, elma posası veya kahve gümüş kabuğu) katma değerli ürünlere dönüştürülmesi süreçlerinde optimizasyon sağlamak ve hammadde israfının azaltılması ile döngüsel ekonomi modeline katkı.
2. Toplam Kalite Yönetimi: Ürünlerin mikrobiyolojik ve kimyasal parametrelerinin (pH, titrasyon asitliği, kuru madde vb.) gerçek zamanlı takibi.
3. İş Sağlığı ve Güvenliği: Risk arz eden proses aşamalarında otomasyon ve robotik sistemlerin devreye sokulmasıyla iş kazalarının minimize edilmesi.
4. Maliyet ve Zaman Tasarrufu: Ar-Ge ve inovasyon süreçlerinde, geleneksel deneme-yanılma metotları yerine modelleme programları kullanılarak ürün geliştirme döngülerinin kısaltılması.

Ancak tüm bu faydalara rağmen YZ kullanımında, data kalitesi, model yorumlama, siber güvenlik, yasal uyumluluk ve kurulum maliyetleri gibi zorluklar da bulunmaktadır.

Gıda mühendisliğinde karmaşık problemlerin çözümü ve proses tasarımı amacıyla en yaygın kullanılan YZ araçları arasında

Yapay Sinir Ağları (YSA), Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ve Genetik Algoritmalar (GA) yer almaktadır (Sofu ve ark., 2007).

YZ Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

Erken Dönem ve Temeller

İnsan dışı bir zeka formu oluşturma fikri antik mitolojilere kadar uzansa da bu alandaki ilk somut mekanik adımlar 19. yüzyılda Charles Babbage'ın analitik makine denemeleriyle atılmıştır. 1950 yılına gelindiğinde Alan Turing, "Hesaplama Makineleri ve Zeka" adlı çalışmasıyla "*Makineler düşünebilir mi?*" sorusunu literatüre kazandırmış ve dijital bilgisayarların bilişsel kapasitesini sorgulayan Turing Testi kavramını geliştirmiştir (Turing, 1950). Aynı dönemde Shannon, bilgisayarların satranç gibi stratejik oyunları oynayabileceğini öngörmüştür.

Dartmouth Konferansı ve Doğuş Dönemi

1956 yılında düzenlenen Dartmouth Konferansı, "Yapay Zeka" (Artificial Intelligence) teriminin resmi olarak ilk kez kullanıldığı ve bu disiplinin temellerinin atıldığı bilimsel dönüm noktasıdır. John McCarthy, Marvin Minsky, Claude Shannon ve Herbert Simon gibi bilim insanlarının öncülük ettiği bu dönemde, sembolik mantık ve geometrik teoremleri çözen ilk ilkel programlar geliştirilmiştir. John McCarthy tarafından geliştirilen LISP programlama dili, sembolik veri işleme yeteneği ile YZ çalışmalarının ana motoru haline gelmiştir.

Duraklama (Karanlık) Dönemi (1965–1970)

Erken dönemde ortaya çıkan aşırı iyimser yaklaşımlar, dönemin bilgisayar donanımlarının işlem gücü yetersizliği ve yüksek maliyetler nedeniyle sekteye uğramıştır. Sadece veri yüklemesi yaparak insan gibi düşünen makineler elde edilemeyeceğinin anlaşılması, araştırmaların ve fonların azalmasına yol açarak bu dönemin "YZ Kışı" (AI Winter) olarak anılmasına neden olmuştur.

Yeniden Doğuş ve Uzman Sistemler Dönemi (1970–1980)

1970’li yıllarla birlikte YZ araştırmacıları, genel problem çözücü sistemler yerine belirli bir alandaki insan uzmanlığını taklit eden "Uzman Sistemler" (Expert Systems) üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle tıp ve endüstriyel teşhis alanlarında geliştirilen yazılımlar, YZ'nin pratik ve ticari başarılar elde edebileceğini kanıtlamıştır. Bu süreçte dilbilim ve psikoloji gibi disiplinler arası ortaklıklar kurulmuştur.

Girişimcilik ve Endüstriyel Entegrasyon Dönemi

1980’lerden günümüze uzanan süreçte, mikroişlemci teknolojilerindeki maliyet düşüşleri ve yüksek işlem kapasiteli bilgisayarların üretilmesi, YZ’yi laboratuvar ortamından çıkarıp ticari bir realiteye dönüştürmüştür. Günümüzde YZ; bulut bilişim, büyük veri (Big Data), makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknolojileriyle birleşerek gıda sektörü de dahil olmak üzere tüm endüstrilerde "İkiz Dönüşümün" (Dijital ve Yeşil Dönüşüm) temel yürütücüsü konumuna gelmiştir.

Doğal ve Yapay Zekanın Karşılaştırmalı Analizi

Gıda Endüstrisinde YZ uygulamalarını değerlendirmeden önce insan zekası yani doğal zekaya kıyasla yapay zekanın çeşitli parametrelere göre güçlü ve zayıf yönlerinin bilinmesi önemlidir. Doğal zeka (insan zekası) ve yapay zekanın (bilgisayar tabanlı zeka) kalıcılık ve hafıza, bilgi transferi, sürdürülebilirlik, tutarlılık, izlenebilirlik, yaratıcılık, sezgi, muhakeme ve esneklik yönlerinden karşılaştırmalı analizi Tablo 1’de özetlenmiştir (Tektaş ve ark., 2005).

Tablo 1 Doğal ve yapay zekanın karşılaştırmalı analizi

Özellik / Parametre	Doğal Zeka (İnsan)	Yapay Zeka (Makine)
Kalıcılık ve Hafıza	Zamanla unutma, yaşlanma veya personelin işten ayrılmasıyla bilgi kaybı riski	Dijital ortamlarda kodlandığı sürece kalıcıdır; kaybolmaz ve unutulmaz.
Bilgi Transferi	Uzun süreli eğitim, çıraklık süreci gerektirir ve tecrübe aktarımı sınırlıdır.	Dijital veri tabanları ve yazılımlar aracılığıyla saniyeler içinde kopyalanıp yayılabilir.
Ekonomik Sürdürülebilirlik	Sürekli insan kaynağı yatırımı, eğitim ve operasyonel maliyetler yüksektir.	İlk kurulum maliyeti sonrası operasyonel ve rutin veri işleme maliyetleri oldukça düşüktür.
Tutarlılık	Yorgunluk, duygusal durum ve çevresel faktörlerden etkilenir; kararlar değişkenlik gösterebilir.	Belirlenen algoritmalar ve matematiksel kurallar çerçevesinde %100 tutarlı çalışır.
İzlenebilirlik ve Belgeleme	İnsanın bir karara varırken kullandığı sezgisel aşamaları raporlaması ve arşivlemesi zordur.	Sistem logları ve veri akış şemaları sayesinde alınan her karar adım adım belgelenebilir.
Yaratıcılık ve Sezgi	Çok yüksektir; deneyimlerden, duylardan ve soyut kavramlardan yeni fikirler üretebilir.	Sınırlıdır; sistem içerisine yerleştirilen veri seti ve kurallar çerçevesinde hareket eder.

Gıda Mühendisliğinde Kullanılan YZ Teknikleri

Gıda işleme teknolojilerinde proseslerin karmaşıklığı, hammaddelerin biyolojik varyasyonları (mevsimsel değişimler, nem farklılıkları vb.) ve doğrusal olmayan kinetik reaksiyonlar, geleneksel istatistiksel modellemeleri yetersiz kılmaktadır. Bu doğrultuda gelişmiş YZ tekniklerinden yararlanılmaktadır. Gıda endüstrisinde kullanılan belli başlı yapay zeka teknikleri; yapay sinir ağları (artificial neural network), bulanık mantık (fuzzy logic) ve genetik algoritmalar (genetic algorithm) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağları, insan beyninin bilgi işleme, öğrenme ve genelleme yeteneklerini taklit eden matematiksel modellerdir. Birbirine bağlı yapay sinir hücrelerinden (nöronlar) oluşan bu sistemler, özellikle girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkinin matematiksel olarak formüle edilemediği non-lineer durumların çözülmesinde yüksek performans gösterir (Haykin, 2014).

YSA'nın Yapısal Mimarisi ("Kara Kutu" Yaklaşımı)

Bir YSA modeli genel olarak hiyerarşik biçimde sıralanmış üç temel katmandan meydana gelir:

1. **Girdi Katmanı (Input Layer):** Dış ortamdan veya proses sensörlerinden alınan verileri (örn. sıcaklık, süre, pH) sisteme kabul eden ve ara katmanlara ileten bölümdür. Bu katmanda genellikle matematiksel bir işlem yapılmaz.
2. **Gizli (Ara) Katmanlar (Hidden Layers):** Verilerin ağırlık katsayıları (weights) ve aktivasyon fonksiyonları ile işlendiği, ağın asıl öğrenme sürecinin gerçekleştiği katmandır. Problemin karmaşıklığına göre birden fazla gizli katman kullanılabilir.
3. **Çıktı Katmanı (Output Layer):** Gizli katmandan gelen sinyalleri işleyerek ağın nihai tahmin veya sınıflandırma sonucunu (örn. raf ömrü, kalite sınıfı) üreten katmandır.

"Kara Kutu" (Black Box) Niteliği: YSA modelleri, girdi vektörlerini çıktı vektörlerine dönüştürürken mükemmel tahmin sonuçları sunmalarına rağmen, arka planda bu sonuçlara hangi ampirik kurallarla ulaşıldıklarına dair analitik bir açıklama sunamazlar. Bu durum mühendislik süreçlerinde "izlenebilirlik" açısından bir dezavantaj gibi görünse de yüksek tahmin başarısı nedeniyle endüstriyel güvenilirliği her geçen gün artmaktadır (Öztemel, 2012).

Gıda Endüstrisinde YSA Uygulamalarına Örnekler

YSA; gıda endüstrisinde proses modelleme, kalite kontrol, mikrobiyolojik büyüme tahmini ve spektrofotometrik verilerin

analizi gibi çok geniş bir yelpazede uygulanmaktadır. Gıda endüstrisinde farklı alanlarda uygulanan bazı YSA çalışmaları aşağıda derlenmiştir.

Gıda kurutma proseslerinin optimizasyonunda YSA, kurutma prosesi değişkenleri ve bu değişkenlerin gıdaya etkileri arasındaki kompleks nonlineer ilişkileri tanımlayabilmesi nedeniyle yaygın olarak uygulanmıştır. YSA modellerinin geleneksel matematiksel modellerden daha iyi performans göstererek domateslerdeki kuruma kinetiğini doğru bir şekilde tahmin ettiği gösterilmiştir (Movagharnejad ve Nikzad, 2007). Benzer bir başarı, sinir ağlarının kurutma işlemleri sırasında gıda sıcaklığı profillerini etkili bir şekilde tahmin ettiği güneş enerjisiyle kurutma için de bildirilmiştir (Tripathy ve Kumar, 2009). Yine kurutma prosesinde, ısıl işlem esnasında gıda matrisinde meydana gelen yapısal değişimlerin modellenmesi amacıyla regresyon analizi ile hibrid sinir ağı tekniklerinin kombine edildiği bir çalışmada elma, havuç, armut, patates, nişasta jelatinleri, soğan, mercimek, sarımsak, kalamar ve kereviz gibi geniş bir gıda spektrumuna ait literatürdeki 286 farklı gözeneklilik veri noktası modellenmiştir. Kurutma sıcaklığı, anlık nem içeriği, başlangıç gözenekliliği ve ürünün botanik/hayvansal kökeni olmak üzere 4 temel girdi parametresine dayanan optimizasyon modelinde, genel gözeneklilik tahmin hatası %0,58 gibi son derece düşük bir seviyede kalmıştır (Hussain ve ark., 2002). YSA yaklaşımları ayrıca havuç küplerinin akışkan yatakta kurutulması, soğan kurutulması, kanola tohumu kurutulması, mango zencefilinin mikrodalgada kurutulması ve dondurarak kurutma işlemlerine de uygulanarak nem oranı, kuruma hızı, su aktivitesi ve kalite özelliklerine ilişkin doğru tahminler sağlanmıştır (Nazghelichi ve ark., 2010; Jafari ve ark., 2016; Malekjani ve ark., 2013; Thrupathihalli ve Balaraman, 2012; Tarafdar ve ark., 2018). Bu çalışmalar, YSA tabanlı modellerin süreç kontrolünü geliştirebileceğini, deneysel maliyetleri azaltabileceğini ve gıda kurutma işlemlerinin optimizasyonunu destekleyebileceğini göstermektedir.

Gıda endüstrisinde hamur reolojisinin belirlenmesi, son ürün kalitesinin standardizasyonu açısından kritik bir öneme sahiptir.

Karıştırma işlemi sırasında meydana gelen tork değişimlerinden hareketle hamurun reolojik davranışlarını tahmin etmek amacıyla yenilikçi bir YSA tasarlanmıştır. Modelin eğitim ve test süreçlerinde, un kalitesini belirlemede geleneksel olarak kullanılan farinograf ve ekstensograf cihazlarından elde edilen veriler referans alınmıştır. Girdisini mikser tork eğrisinin, çıktısını ise reolojik parametrelerin oluşturduğu geri yayılım algoritmali (backpropagation) YSA modeli, reolojik özellikleri %94'ün üzerinde bir doğrulukla tahmin etmeyi başarmıştır. Bu sayede, her parti hamurun yapısal özellikleri üretim hattından ayrılmadan anlık olarak ölçülebilmüş ve proses koşullarının çevrimiçi (on-line) olarak kontrol edilmesine olanak tanınmıştır. Yöntemin, hamur hazırlama aşamasındaki değişkenlikleri minimize ederek ürün kalitesini artırdığı ve operasyonel maliyetleri düşürdüğü tespit edilmiştir (Ruan ve ark., 1995). YSA modelleri daha sonra birçok çalışmada hamurun reolojik özelliklerinin prediktif olarak belirlenerek hamur davranışlarının reolojik testler gerektirmeden un kompozisyonu ve karıştırma gibi karakteristikleri üzerinden hesaplanmasında kullanılmıştır (Razmi-Rad et al., 2007; Codină et al., 2019; Raj et al., 2024). Bunlara ek olarak, GA ile birleştirilmiş YSA modelleri, uzama direnci, uzayabilirlik ve hamur enerjisi gibi ekstensograf parametrelerini yüksek doğrulukla tahmin ederek YZ teknolojilerinin bu alanda başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir (Abbasi ve ark., 2012).

Fermentasyon süreçlerinin takibinde ise sensör füzyonu (veri kaynaştırma) teknikleri ön plana çıkmaktadır. Laboratuvar ölçekli yoğurt fermentasyonunun anlık takibini gerçekleştirmek üzere elektronik burun (EN), yakın kızılötesi spektroskopisi (NIRS) ve standart biyoreaktör problemlerinden (pH, sıcaklık vb.) gelen sinyaller, kademeli bir sinir ağı mimarisinde birleştirilmiştir. Bu sistemde iki aşamalı bir kontrol mekanizması işletilmiştir:

- Birincil Ağ (Kantitatif): Laktoz, galaktoz ve laktik asit konsantrasyonlarındaki nicel değişimleri tahmin etmiştir.
- İkincil Ağ (Kalitatif): Koagülasyonun (pıhtılaşmanın) başlangıcı ve fermentasyonun sonlandırılacağı zaman gibi kritik niteliksel aşamaları tanımlamıştır.

Hatalı veya gürültülü sinyallerin filtrelenmesiyle sistemin kararlılığı ve tahmin doğruluğu çevrim dışı (off-line) laboratuvar analizleriyle yarışır düzeye getirilmiştir. Bu yaklaşım, biyoteknolojik gıda proseslerinde çevrimiçi kalite kontrolün geliştirilmesinde güçlü bir model teşkil etmektedir (Cimander ve ark., 2002).

YSA, fermantasyon teknolojisinde proses izleme, mikrobiyal büyüme tahmini, metabolit üretim modellemesi ve fermantasyon optimizasyonu için kullanılabilir. Garcia-Gimeno ve ark. (2005), YSA kullanarak *Leuconostoc mesenteroides* gelişimini başarıyla modellemiştir. YSA modelleri ayrıca pH, CO₂ üretimi, sıcaklık ve fermantasyon süresi gibi proses değişkenlerinden biyokütle ve substrat konsantrasyonlarını doğru bir şekilde tahmin ettikleri alkolik fermantasyon süreçlerine de uygulanmıştır (Sipos ve ark., 2021). Yoğurtlardaki simbiyotik starter kültür popülasyonunun (*Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* ve *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus*) eş zamanlı ve hızlı sayımı için piroliz-kütle spektrometrisi (PyMS) ve YSA kombinasyonuna dayalı hibrit bir yöntem tasarlanmıştır. Santrifüjleme ve turbidimetrik ölçümlerle elde edilen toplam bakteri kütlesi PyMS ile analiz edilmiş, elde edilen spektral veriler YSA modelleriyle çözümlenmiştir. Seçici besi yerlerinde (SYL agar) yapılan klasik sayımlarla karşılaştırıldığında, YSA modelinin *S. thermophilus* için $R^2 = 0.98$, *L. bulgaricus* için ise $R^2 = 0.96$ korelasyon sağladığı görülmüştür. Bu yaklaşım, fermente ürünlerde zaman alan klasik mikrobiyolojik sayımların yerine dakikalar içinde sonuç veren bir otomasyon alternatifi sunmuştur (Talon ve ark., 2002). Ayrıca, YSA ve genetik algoritma yaklaşımları, fermantasyon ortamı optimizasyonu ve metabolit verimi tahmini için yaygın olarak kullanılmış olup, optimum süreç koşullarının etkili bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır (Singh ve ark., 2017). Bu çalışmalar, YSA tabanlı modellerin gösterdiği yüksek doğruluklu tahminlerin deneysel iş yükünü azaltabileceğini göstermektedir.

YSA ile modelleme gıda analizlerinde de yaygın olarak uygulanmıştır. Kimyasal analizlerin hızlandırılması kapsamında, gıdalarda yaygın olarak kullanılan sentetik antioksidanlardan bütillenmiş hidroksianisol (BHA), bütillenmiş hidroksitoluen (BHT)

ve propil gallat (PG) karışımlarının spektrofotometrik verileri YSA ile çözümlenmiştir. Bu antioksidanların Fe(III) iyonlarını Fe(II)'ye indirgeme reaksiyon kinetiklerindeki farklılıklar, 510 nm dalga boyunda izlenerek kaydedilmiştir. Elde edilen diferansiyel kinetik spektrumlar; Yapay Sinir Ağları (YSA), Klasik En Küçük Kareler (CLS), Temel Bileşen Regresyonu (PCR) ve Kısmi En Küçük Kareler (PLS) gibi kemometrik yöntemlerle işlenmiştir. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, YSA modelinin diğer doğrusal kemometrik yaklaşımlara (CLS, PCR, PLS) kıyasla çok daha yüksek bir hassasiyet ve seçicilik sunduğu, ticari gıda örneklerinde antioksidan tayini için başarıyla uygulanabileceği gösterilmiştir (Yongnian ve Chao, 1999).

Dondurma teknolojisinde, farklı geometrilere sahip gıda maddelerinin donma sürelerinin doğru tahmini için ampirik Pham modeli verileriyle eğitilmiş ve WardNet mimarisine dayanan bir YSA geliştirilmiştir. Modelde; Ürün kalınlığı (a), genişlik (b), uzunluk (c), konvektif ısı transfer katsayısı (h_c), donmuş ürün ısı iletkenliği (k), ürün yoğunluğu (ρ), donmamış ürün özgül ısısı (C_{pu}), nem içeriği (m), başlangıç sıcaklığı (T_i) ve ortam sıcaklığı (T_∞) girdi değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Gizli katmanlardaki nöron sayısının, öğrenme katsayısının ve momentum parametrelerinin optimize edilmesiyle, donma sürelerinin karmaşık matematiksel denklemlere ihtiyaç duyulmadan, pratik ve yüksek doğrulukla tahmin edilebileceği doğrulanmıştır (Mittal ve Zhang, 2000).

Prediktif mikrobiyoloji alanında, mayonez benzeri asidik emülsiyon sistemlerinde patojen *Escherichia coli* O157:H7 suşlarının "yaşam/ölüm" ve "büyüme/büyüme olmaması" sınırlarını belirlemek üzere üç katmanlı bir geri yayılım sinir ağı kurulmuştur. Modelin girdilerini sıcaklık, pH, asetik asit, sakaroz ve tuz konsantrasyonları oluşturmuştur. Beş farklı patojen suşun kombinasyonundan elde edilen 1820 deneysel veri noktasının işlenmesiyle eğitilen ağ, büyüme sınırlarını %99,5, mikrobiyal ölüm/canlılık arayüzünü ise %99,1 doğruluk oranıyla sınıflandırmıştır. Gerçek mayonez matrislerinde yapılan testlerde, modelin patojen davranışını %90 ile %100 arasında değişen tam isabetle öngördüğü belirlenmiş; bu yönüyle YSA'ların gıda

güvenliği risk analizlerinde geleneksel mikrobiyolojik ekim yöntemlerine güçlü bir alternatif olduğu ortaya konmuştur (Yu ve ark., 2005).

Sofu (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, depolama sürecindeki yoğurtların fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve görsel özellikleri bilgisayarlı görüntü analizi ve YSA entegrasyonu ile incelenmiştir. Yoğurdun 14 günlük raf ömrü boyunca meydana gelen pH değişimleri, toplam mezofilik bakteri, maya-küf ve koliform yükleri ile görüntüleme sisteminden elde edilen sayısal renk verileri girdi; kalan raf ömrü ise çıktı olarak ağa tanıtılmıştır. Sigmoid aktivasyon fonksiyonuna sahip tek gizli katmanlı geri yayılım ağı, deneysel verilerle $R^2 = 0.9996$ gibi mükemmel bir uyum göstermiştir. Bu model sayesinde, piyasadan toplanan ticari yoğurtların etiket ömürlerinin doğrulanması, üretici bazlı kalite standardizasyonu ve tüketici güvenliğinin anlık olarak denetlenmesi için dijital bir altyapı oluşturulmuştur.

Çay endüstrisinde ürün standardizasyonu ve coğrafi işaretleme çalışmaları için çay varyetelerinin antioksidan kapasitelerine göre sınıflandırılmasında YSA modelleri önerilmiştir. Geliştirilen ilk ileri beslemeli ağ modeliyle çayların toplam flavonoid (F), toplam kateşin (C) ve toplam metilksantin (MX) içeriklerine bağlı olarak toplam antioksidan aktiviteleri (AA) yüksek bir isabetle tahmin edilmiştir. İkinci aşamada ise olasılıksal bir YSA (Probabilistic Neural Network) mimarisi kullanılarak yeşil çay, siyah çay ve poşet siyah çay sınıfları %100'e yakın bir başarıyla birbirinden ayırt edilmiştir (Cimpoiu ve ark., 2011).

Tarımsal hammaddelerin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılmasında da yapay zeka tabanlı morfolojik analizlerden yararlanılmaktadır. Türkiye'de kültürü yapılan altı farklı yulaf çeşidinin bin dane ağırlığı, geometrik ortalama çapı, küreselliği, hacmi, yüzey alanı, porozitesi ve renk değerleri YSA modeline girdi olarak verilmiştir. Çeşitlerin morfolojik olarak sınıflandırılmasında model, $R^2 = 0.99999$ determinasyon katsayısı ve 0.00006 gibi sıfıra yakın bir RMSE (Hata Kareler Ortalamasının Karekökü) değeriyle kusursuz bir performans sergilemiştir (Taner ve ark., 2012).

Benzer şekilde, makarnalık buğday çeşitlerinin otomasyona dayalı sınıflandırılması amacıyla 11 girdi, 2 gizli ve 1 çıktı katmanından oluşan "M-1" isimli bir YSA mimarisi geliştirilmiştir. Ülkemizde yaygın olarak üretilen 11 adet makarnalık buğday çeşidinin fiziksel ve optik parametrelerini işleyen bu model; %99.99 R^2 ve %0.009 ortalama nispi hata ile çalışmıştır. Geliştirilen bu yazılımın Ticaret Borsalarında ve un/ırmik fabrikalarının hammadde kabul ünitelerinde ürün saflığını belirleme ve yabancı varyeteleri temizleme otomasyonlarına entegre edilebileceği belirtilmiştir (Taner ve ark., 2015).

Hayvansal ürünlerin kalite kontrolünde, etlik piliç karkaslarındaki tümörlü, yaralı veya kusurlu dokuların normal dokulardan ayırt edilmesi amacıyla gri skala yoğunluk matrisleri, Fourier güç spektrumu ve fraktal analiz verileri sinir ağlarına entegre edilmiştir. Tasnif sisteminde %91 ile %97 arasında değişen yüksek bir doğruluk oranına ulaşılmıştır (Park ve ark., 1996). Benzer şekilde, karkaslar üzerindeki epidermal tümörlerin hiper ve multi-spektral dijital görüntü işleme algoritmalarıyla başarıyla haritalandırılabilceği ortaya konmuştur (Chao ve ark., 2002).

Tahribatsız (non-destructive) kalite belirleme çalışmaları kapsamında; tatlı soğanların hasat sonrası depolama sürecinde meydana gelen iç bozulma ve çürümeleri, X-ışını (X-ray) görüntüleme teknikleri ve YSA tabanlı örüntü tanıma modelleriyle sınıflandırılmıştır (Tollner ve ark., 1999). Meyve teknolojisinde ise Golden cinsi elmalarda mekanik hasar ve kesimleme etkilerini incelemek üzere objektif renk modelleri (Leemans ve ark., 1998) ve elmaların küresellik derecelerine göre morfolojik tasnifini yapan geometrik algoritmalar geliştirilmiştir (Tao ve Wen, 1999). Elmaların yüzey kusurları ve şekil deformasyonlarına göre kalibre edilen bir YSA sınıflandırma sisteminin ise %96.6 oranında ticari başarı sağladığı rapor edilmiştir (Yang, 1993).

Literatürde öne çıkan bazı spesifik uygulama alanları ve metodolojileri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2 Gıda Endüstrisinde YSA Çalışmalarına Örnekler

Gıda Matrisi / Proses/Gıda güvenliği	Girdi Parametreleri	Çıktı / Tahmin Edilen Parametre	Yöntem / Başarı Oranı	Kaynak
Fermente Süt Ürünleri (Yoğurt)	Depolama süresi, sıcaklık, bilgisayarlı görüntü verileri	Kimyasal ve mikrobiyolojik değişimler, Raf ömrü tahmini	Bilgisayarlı görüntüleme analizi ile entegre YSA modeli	Sofu (2006)
Süt Teknolojisi (Peynir)	Koagülasyon süreci parametreleri	Pıhtılaşma esnasındaki pH değişimi	Üç katmanlı ileri beslemeli YSA mimarisi	Kavas (2012)
Konserve Gıdalar (Isıl İşlem)	Otoklav sıcaklığı, t_i , t_{i-1} , t_{i-2} anındaki soğuk nokta sıcaklıkları	t_{i+1} anındaki soğuk nokta sıcaklığı	Geri yayımlı Jordan ağırları; %2.2 ortalama bağıl hata	Gonçalves ve ark. (2005)
Yüksek Basınç Uygulamaları (HPP)	Uygulanan basınç, basınç artış hızı, kabin ve ortam sıcaklıkları	Maksimum/minimum sıcaklıklar ve termal denge süresi	Çok katmanlı algılayıcı (MLP) ile yüksek doğrulukta proses modelleme	Torrecilla ve ark. (2005)
Kurutma Teknolojisi (Domates)	Kurutucu gücü, hava akış hızı, kurutma süresi	Nem transferi ve kurutma kinetiği	YSA modellerinin standart matematiksel eşitliklerden daha yüksek korelasyon (R^2) vermesi	Movaghar nejad ve Nikzad (2007)
Tahıl Ürünleri (Buğday Unu)	Protein içeriği, yaş gluten, sedimentasyon değeri, düşme sayısı	Farinografik özellikler (Su tutma, hamur gelişim ve stabilite süresi)	Geri yayımlı eğitim algoritmalı çok katmanlı YSA	Razmi-Rad ve ark. (2007)

Gıda Mikrobiyolojisi	Sıcaklık, pH, tuz ve sodyum nitrit konsantrasyonları	L.mesenteroides mikrobiyal gelişme hızı, lag evresi süresi, maksimum popülasyon	%2.82 - %6.05 standart hata; Cevap Yüzeyi Yönteminden (RSM) daha başarılı	Garcia-Gimeno ve ark. (2005)
Gıda Güvenliği	Toplam bakteri ve basil sayısı (Görüntü işleme tabanlı)	Toplam koliform bakteri yükü tahmini	İki gizli katmanlı YSA; deneysel verilerle R = 0.9716 korelasyon	Yin ve Ding (2007)
Sıvı Yağlar ve Salça (Renk & Kalite)	Spektrofotometrik absorbans verileri, RGB histogramları	CIE L*, a*, b* renk formatı ve siyah benek sınıflandırması	Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GKA) destekli YSA; analiz süresi 5 dk'dan 20 sn'ye düşmüştür	Kılıç ve ark. (2007b); Velioğlu (2010)
Mikotoksin Analizi	365 nm UV ışık altındaki RGB renk yoğunlukları	Kuru incirde Aflatoksin varlığı/yokluğu (1/0)	Görüntü işleme ve YSA kombinasyonu; test verilerinde R = 0.899 başarı	Velioğlu (2010)
Endüstriyel Maya Fermantasyonu	On-line proses ölçümleri	Maya konsantrasyonu ve özgül üreme hızı	YSA tabanlı yazılım-sensörler (soft-sensors) ile anlık on-line kontrol	Karakuzu ve ark. (2006)
Tahıl Kalite Kontrolü (Mısır)	Çekirdek şekli dijital profil sinyalleri	Kırık/bütün çekirdek ayrımı ve sınıflandırma	Makine öğrenmesi algoritması; kırık ve tam çekirdeklerde %91-%99 sınıflandırma başarısı	Liao ve ark. (1993)

Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Bulanık Mantık, kesin sınırları olmayan, belirsizlik içeren ve insan sağduyusuna dayanan dilsel ifadelerin matematiksel olarak modellenmesini sağlayan bir disiplindir. Geleneksel bilgisayar sistemleri sadece ikili (binary) mantık rejiminde (0 veya 1, doğru veya yanlış) çalışırken bulanık mantık gerçek dünyadaki durumları (0,1) kapalı aralığında süreklilik arz eden üyelik fonksiyonlarıyla (membership functions) ifade eder (Zadeh, 1965). Yani bulanık mantık, insanın muhakeme ve karar verme süreçlerinde tahmine dayalı çıkarım yapma yeteneğini taklit etmektedir. Geleneksel mantık sistemlerinden farklı olarak insanlar, karar verirken sıklıkla kesin olmayan veya subjektif bilgilere güvenirler. Örneğin bir kişi, kesin bir sayısal değer belirtmeden bir gıdanın sıcaklığını “sıcak”, “ılık” veya “soğuk” olarak sınıflandırabilir. Bulanık mantık, bu tür belirsiz bilgilerin temsil edilmesi ve işlenmesi için matematiksel bir çerçeve sunarak, daha insan benzeri karar almayı mümkün kılar (Kılınç ve ark., 2024).

Bulanık Mantığın Gıda Endüstrisindeki Uygulamaları

Bulanık mantık, belirsizlik ve subjektif karar verme süreçlerini ele alma yeteneğinden dolayı gıda endüstrisinde önemli bir yapay zeka aracıdır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda bulanık mantık, gıda kalitesi değerlendirmesi, raf ömrü tahmini, tazelik değerlendirmesi, gıda güvenliği yönetimi ve akıllı süreç kontrol sistemlerine uygulanmıştır (Kılınç ve ark., 2024). Gıda endüstrisinde ham maddelerin biyolojik yapısından kaynaklanan heterojenlik ve doğrusal olmayan proses dinamikleri, klasik kontrolörlerin (örn. standart PID) başarısını sınırlandırır. Klasik mantıkta bir durum ya doğrudur (1) ya da yanlıştır (0). Ancak biyoreaktörlerdeki mikrobiyal gelişim gibi karmaşık biyolojik süreçlerde koşullar genellikle kesin sınırlarla tanımlanamaz. Örneğin bir fermentasyon ortamında sıcaklık, pH veya oksijen düzeyi "uygun" ya da "uygun değil" şeklinde kesin olarak sınıflandırılmayabilir; bunun yerine "biraz uygun", "oldukça uygun" veya "çok uygun" gibi ara durumlar söz konusu olabilir. Guillaume ve Charnomordic (2000)'in çalışmasında kullanılan bulanık mantık yaklaşımı, bu tür belirsiz ve

kademeli durumları matematiksel olarak ifade etmeye olanak sağlamıştır. Böylece sistem, yalnızca siyah-beyaz kararlar vermek yerine, uzman operatörlerin kullandığı insan benzeri değerlendirmeleri modelleyebilmiştir. Bulanık mantık; gıdalarda sınıflandırma, kalite derecelendirme, duyu analizlerin sayısallaştırılması ve ürün tasarımı gibi birçok alanda kullanılmıştır. Bulanık mantık modelleri, uyarlanabilir kontrolörlerin (adaptive controllers) gerçek zamanlı parametre ayarlaması yoluyla süreç verimliliğini ve ürün kalitesini iyileştirdiği gıda kurutma operasyonlarına da başarılı bir şekilde entegre edilmiştir (Hosseinpour ve Martynenko, 2021; Clotz, 2025). Ayrıca, gıdanın otantisitesi, taşıma tespiti, koruma çalışmaları ve otomatik kalite kontrol sistemlerinde bulanık mantık kullanılmış olup, karmaşık gıda işleme verilerinin yönetilmesinde ve uzman karar verme sürecinin desteklenmesinde etkinliklerini göstermektedir (Mavani ve ark., 2025; Wang, 2025). Bu uygulamalar bulanık mantığın modern gıda üretim sistemlerinde akıllı kontrol, kalite yönetimi ve optimizasyon için değerli bir araç olmaya devam ettiğini göstermektedir.

Gıda endüstrisindeki proseslerin kayıtlı geçmiş verilerinde, insan operatörlerin tecrübelerine dayalı gizli bilgi kalıpları yer almaktadır. Guillaume ve Charnomordic (2000) tarafından yapılan çalışmada, bu gizli uzmanlık bilgisini (hidden expert knowledge) keşfetmek ve anlamlandırmak amacıyla kendi kendine öğrenen (self-learning) bir bulanık kontrolör (fuzzy controller) mimarisi tasarlanmıştır. Kuralların optimizasyonunda genetik algoritmalarla yararlanılan bu sistem, karmaşık peynir üretim aşamalarından elde edilen veritabanı üzerinde test edilmiş ve operatör kararlarını başarılı bir şekilde kural tabanlı mantığa dönüştürmüştür.

Endüstriyel kızartma proseslerinde, yüksek sıcaklık altında yağda meydana gelen fiziko-kimyasal bozulmaları en aza indirmek ve son ürünün tat-estetik değerlerini korumak amacıyla bulanık mantığa dayalı iki aşamalı bir kontrol mekanizması geliştirilmiştir.

- Birinci Aşama: Ham ürünü ısıtmak (Q_2) ve kızartma yağını stabilize etmek (Q_3) için gerekli termal güç akılarını dengeler.

- İkinci Aşama: Fritöz haznesindeki anlık yağ sıcaklığı (T_3) ile taşıma bandının konveyör hızını (v_p) eş zamanlı kontrol eder.

Bu iki aşamalı bulanık karar mekanizması sayesinde, yağın termal dehidrasyonu önlenirken, kızartılmış gıdanın duyu kalitesi korunmuş ve kızartma prosesinin enerji verimliliği artırılmıştır (Rywotycski, 2003).

Sınıflandırma performanslarının karşılaştırıldığı bir diğer çalışmada, elmaların kalite özelliklerine göre tasnif edilmesinde Bulanık Mantık, Yapay Sinir Ağları ve geleneksel Bayes istatistiksel sınıflandırıcıları test edilmiştir. Giriş verilerinin normal dağılım sergileme zorunluluğu olan Bayes sınıflayıcısı %79, esnek üyelik fonksiyonlarına sahip bulanık sınıflayıcı %80 başarı gösterirken; doğrusal olmayan örüntüleri çözmede en kararlı yapı olan yapay sinir sınıfları %88 ile en yüksek sıralama performansını sergilemiştir (Şahin ve ark., 2001).

Tüketici odaklı kalite algısının modellenmesi amacıyla, domateslerin dış görünüş, doku ve koku parametreleri bulanık mantık tabanlı bir bilgisayarlı görme sistemine entegre edilmiştir. Boyut, renk homojenliği, şekil kusurları ve anormallikler gibi görsel nitelikler tahribatsız (non-destructive) görüntü analizleriyle sayısallaştırılmıştır. Bu sistem, değişen tüketici beklentilerine ve üretici standartlarına göre dinamik olarak optimize edilebilen, esnek bir objektif duyu analiz aracı olarak yapılandırılmıştır (Jahns ve ark., 2001).

Otomatik kalite kontrolünün bir diğer uygulaması pizza üretim hattında gerçekleştirilmiştir. Pizza taban alanı, dairesellik derecesi ve domates sosunun yüzeye yayılım homojenliği bilgisayarlı vizyon ve bulanık mantık kombinasyonu ile incelenmiştir. Geliştirilen bulanık karar mekanizması, sos dağılımındaki hataları ve yapısal kusurları %92 gibi yüksek bir sınıflandırma doğruluğu ile "kabul edilebilir" veya "kusurlu" olarak ayırmayı başarmıştır (Sun ve Brosnan, 2003a,b).

Biyoreaktör verimliliğinin artırılması amacıyla, substrat inhibisyonu ve Gauss gürültüsü (endüstriyel sinyal kirliliği)

eklenmiş kesikli (batch) mikrobiyal fermantasyon süreçlerine bulanık tahmin modelleri uygulanmıştır. Hücre büyümesi, substrat tüketimi ve ürün konsantrasyonları arasındaki geri besleme etkileşimleri, esnek üyelik fonksiyonları içeren basit "Eğer-İse" (If-Then) kurallarıyla simüle edilmiştir. Modelin, çevrimiçi (on-line) biyoreaktör izleme süreçlerinde klasik ampirik denklemlerden daha hassas sonuçlar ürettiği görülmüştür (Patnaik, 1997).

Gıda arz güvenliği ve makroekonomik risk analizleri kapsamında, Tip-2 Bulanık Çıkarım Sistemleri (Type-2 Fuzzy Inference Systems) kullanılarak stratejik tahminlemeler yapılmıştır. Tahıl verimi, toplam üretim miktarı ve ekonomik büyüme verileri girdi; gıda güvenliği risk düzeyi ise çıktı olarak tanımlanmıştır. Belirsizlik payı yüksek olan dilsel terimler Tip-2 bulanık kümeleriyle temsil edilerek kurallar oluşturulmuştur. Türkiye'nin 1961-2012 yılları arasındaki 50 yıllık tarihsel tahıl verileriyle test edilen sistemin, gıda arzı üzerinde oluşabilecek baskı dönemlerini ve risk sürelerini önceden başarıyla öngörebildiği tespit edilmiştir (Abiyeva ve ark., 2016). Benzer şekilde, FAO stratejik programlarında yer alan çok değişkenli gıda güvenliği göstergeleri arasındaki neden-sonuç ilişkilerini resmileştirmek amacıyla bulanık bilişsel haritalama (Fuzzy Cognitive Mapping) ve sınırlı mantıksal kurallara dayanan modeller geliştirilmiştir (Aliyeva ve ark., 2017).

Biyoteknolojik gıda ve içecek proseslerinde canlı organizmaların zamanla değişen, doğrusal olmayan davranışları nedeniyle kesin bir proses tekrarlanabilirliği sağlamak oldukça zordur. Bu çok değişkenli sistemlerin optimizasyonunda insan uzmanlığını ve bulanık mantık tabanlı hibrit kontrol stratejilerini entegre etmenin, endüstriyel ölçekteki parça işlem bilgilerini yönetmede ve ürün standardizasyonunu sağlamada en yüksek potansiyele sahip yöntemlerden biri olduğu vurgulanmaktadır (Birle ve ark., 2013).

Gıda güvenliğinde mikrobiyal tehlikelerin erken evre risk değerlendirmesi amacıyla Bulanık Risk Değerlendirme Aracı (FRAT) geliştirilmiştir. Kullanıcılar hammadde başlangıç kontaminasyon düzeyini, işleme adımlarındaki değişimleri ve tüketici hazırlık aşamalarındaki olası kontaminasyon faktörlerini

dilsel terimler veya yarı-nicel aralıklarla sisteme girmektedir. Aralık aritmetiği kullanan bu bulanık araç, tüketim sonrası oluşabilecek sağlık risklerini ve maruziyet düzeylerini başarıyla hesaplamıştır (Davidson ve ark., 2006).

Sıvı gıdalarda pH stabilizasyonunun sağlanması, ürün kalitesi ve mikrobiyal güvenlik için kritik bir parametredir. Bir reaktör tankındaki doğrusal olmayan pH değişim süreci, kısmen bilinen sistem dinamiklerinden dolayı bir "gri kutu" olarak ele alınmış ve Entegre Gri Tahmin Bulanık Kontrol (GPFC) stratejisi uygulanmıştır. Birinci mertebeden gri modelle bir adım sonrasının tahmin edildiği bu sistemde, bulanık kontrolör reaktöre verilecek asit (HCl) veya baz (NaOH) dozajını anlık olarak düzenlemiştir. *Acetobacter xylinum* fermantasyonunda selüloz ve asetik asit üretimini kontrol etmek amacıyla uygulanan bu GPFC şeması; sürekli kontrolde %1'den daha az bir kararlı durum hatası ile çalışmış, klasik PID veya manuel kontrole kıyasla daha az kimyasal madde tüketerek daha yüksek ürün verimi sağlamıştır (Chung ve ark., 2010).

Koruyucu fito-kimyasalların gıdalara entegrasyonunda, ham elma sularına ilave edilen organoleptik olarak kabul edilebilir tembul yaprağı esansiyel yağı (BLEO) konsantrasyonu bulanık mantık benzerlik analizleriyle belirlenmiştir. Tüketici paneli verilerinin bulanıklaştırılmasıyla en ideal konsantrasyon 0.19µL/mL olarak tespit edilmiştir. BLEO katkılı elma sularının buzdolabı şartlarındaki (4°C) depolamasında; toplam antioksidan kapasitenin korunduğu ve mikrobiyal güvenli sınırların (toplam aerobik bakteri yükünün 2 log kob/mL sınırını aşma süresi) kontrol grubuna kıyasla raf ömrünü 6 gün uzattığı kanıtlanmıştır (Basak, 2018).

Endüstriyel kefir üretiminde, fermantasyonun tam pH 4.6 seviyesinde sonlandırılması standardizasyon için şarttır. İnkübasyon sıcaklığı (20-25°C), inkübasyon süresi (18-22 saat) ve kültür inokülasyon oranı (%1-5) gibi çok değişkenli parametrelerin pH üzerindeki etkisini denetlemek amacıyla Mamdani tipi Bulanık Çıkarım Sistemi tasarlanmıştır. Üç girdi parametresi için tanımlanan üçer adet üçgen üyelik fonksiyonunun kombinasyonu ile 3x3x3=27 kural satırından oluşan bir kural tabanı üretilmiştir. Berraklaştırma

(defuzzification) aşamasında "Ağırlık Merkezi" (Centroid) yöntemi kullanılarak hedef pH değerlerine ulaşılmıştır. Modelin uygulanmasıyla deneme-yanılma süreçleri ortadan kaldırılmış, insan iş yükü azaltılarak kefir üretiminde zaman ve maliyet tasarrufu optimize edilmiştir (Akgül ve ark., 2014).

Süt endüstrisindeki operasyonel süreçlerin optimizasyonu kapsamında, hammadde (çiğ süt) arzı ve son ürün taleplerindeki belirsizliklerin yönetilmesi amacıyla Bulanık Doğrusal Programlama (Fuzzy Linear Programming) modeli uygulanmıştır. Gerçek ticari işletme verileriyle yapılan üretim planlama simülasyonlarında, bulanık modelin geleneksel deterministik doğrusal programlamaya kıyasla piyasa belirsizliklerini daha gerçekçi yansıttığı ve işletme karlılığını bir önceki yıla göre %36 oranında artırdığı ortaya konmuştur (Demiral, 2013).

Fırıncılık ürünlerinin pişme kalitesinin takibinde, çikolatalı kurabiyelerin pişme esnasında üst yüzeylerinde oluşan renk-matlık ve şekil-büyükölçölük gibi fiziksel makro özellik değışimlari sayısal görüntü analiz sistemleriyle izlenmiştir. Elde edilen veriler tüketicilerin görsel beğeni algılarıyla eşleştirilerek dört farklı bulanık mantık modeli altında başarıyla sınıflandırılmıştır (Davidson ve ark., 2006).

Genetik Algoritmalar (GA)

Genetik Algoritmalar (GA), Charles Darwin'in "Doğal Seçilim" ve evrim teorisi ilkelerine (en uyumlunun hayatta kalması, mutasyon, çaprazlama/krossover) dayanan stokastik (rastlantısal) küresel optimizasyon yöntemleridir (Goldberg, 1989). Klasik optimizasyon tekniklerinin aksine, arama uzayında tek bir noktadan değil, bir noktalar kümesinden (popölasyon) başlayarak ilerlerler. Bu özellikleri sayesinde yerel minimum/maksimum (local optima) tuzaklarına düşmeden, karmaşık arama uzaylarında küresel optimumu (global optimum) bulmada son derece başarılıdırlar.

GA'nın gıda mühendisliği süreçlerindeki temel avantajları şunlardır:

- Problem alanına ait türev veya sürekli fonksiyonlar gibi ağır matematiksel ön koşullara ihtiyaç duymazlar.

- Kullanıcının çok derin analitik matematik bilgisine gereksinim duymadan karmaşık mühendislik problemlerini kromozom dizileri şeklinde kodlamasına imkan tanırırlar.
- Gıda endüstrisinde proses parametrelerinin optimizasyonunda (örn. minimum enerjiyle maksimum kurutma hızı), ürün reçetesi tasarımlarında, depolama ve lojistik zincir sistemlerinin kontrolünde ve tarımsal rekolte tahminlerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler (Goldberg, 1989).

Özellikle gıdaların dehidrasyonu (kurutulması) gibi kütle ve ısı transferinin eş zamanlı gerçekleştiği süreçlerde kinetik parametrelerin kestirimi amacıyla GA ile Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemleri (ANFIS) kombine edilerek hibrit yapılar oluşturulmaktadır. Bu gelişmiş optimizasyon araçları, hızlı servis (fast-food) gıdalarının işlenmesi sırasında duyuşal ve mikrobiyolojik nitelikleri en üst düzeyde tutacak en ideal proses kombinasyonlarının kendi kendine öğrenen sistemler tarafından belirlenmesini hedeflemektedir.

Genetik Algoritmaların Temel Çalışma İlkeleri

Genetik Algoritmalar (GA), biyolojik evrim ve doğal seçim mekanizmalarını bilgisayar ortamında simüle eden stokastik arama yöntemleridir. GA'ların geleneksel optimizasyon algoritmalarından ayrılan en temel felsefesi, doğrudan parametre değerlerinin kendisiyle değil, bu parametrelerin temsil edildiği genetik kod dizileriyle (kromozomlar) çalışmasıdır. Süreç, arama uzayında tek bir çözüm noktası üzerinden ilerlemek yerine, çok sayıda potansiyel çözüm adayını barındıran bir popülasyon (çözüm grubu) üzerinde yürütülür. Bu çok noktalı arama stratejisi, algoritmanın yerel optimum (local optima) tuzaklarına takılmasını önleyerek, arama uzayının tamamında küresel bir tarama (global search) yapılmasına ve doğrudan küresel optimuma yönelinmesine olanak tanır (Morimoto ve ark., 1997).

Bir GA uygulamasının başarıyla yürütülebilmesi için öncelikle probleme ait parametrelerin uygun şekilde kodlanması ve bireylerin başarısını ölçecek bir uygunluk (fitness) kriterinin tanımlanması

gerekir. Algoritma, popölasyonda yer alan bireylerin uygunluk değerlerini doğal seçilim ilkelerine göre bir değerlendirmeye tabi tutarak olasılıksal bir arama gerçekleştirir. Kodlama mekanizmasının temel amacı, orijinal optimizasyon problemini kombinatorial bir probleme dönüştürmektir. Optimizasyon sürecinde, probleme ait sınırları ve hedefleri belirleyen bir amaç (objektif) fonksiyonu tanımlanır; gıda mühendisliği uygulamalarının büyük bir kısmında bu amaç fonksiyonu, doğrudan maksimize ya da minimize edilmesi hedeflenen uygunluk fonksiyonunun kendisidir (Ellis ve ark., 2004).

Genetik Algoritmaları geleneksel optimizasyon ve arama yöntemlerinden ayıran temel karakteristik özellikler şu şekilde özetlenebilir:

- Global Arama Kabiliyeti: Tek bir czm noktası yerine, aday czmlerden oluşan bir grup (popölasyon) zerinde işlem yapar. Bu sayede yerel czmlere takılmadan, küresel arama performansı gösterir.
- Türev ve Diferansiyel Bağımsızlığı: Arama uzayında yn bulabilmek için fonksiyonun türevi, sürekliliği veya diferansiyel özellikleri gibi ek matematiksel bilgilere ihtiyaç duymaz; sadece amaç (uygunluk) fonksiyonundan gelen geri bildirimleri kullanır.
- Olasılıksal alışma Prensibi: Bireylerin seçimi, çaprazlanması ve mutasyona uğratılması aşamalarında deterministik (kesin) kurallar yerine, stokastik (olasılıksal) kuralları işletir. Bu nedenle algoritmanın performansı kesin hatlarla önceden belirlenemese de istatistiksel olasılıklarla yüksek doğrulukta hesaplanabilir.
- Kr Arama Metodu: Algoritma problem sahasının teorik içeriğine veya ne yaptığına dair özgün bir bilgi barındırmaz, sadece genetik operatörler vasıtasıyla süreci nasıl yürüteceğini bilir. Bu yönüyle evrensel ve kr bir arama mekanizmasıdır.

- Kombinatoryal Atama Mekanizması: Parametrelerin doğrudan kendisi yerine kodlanmış dizileriyle (ikili/binary veya reel sayı dizileri) uğraşarak optimizasyonu kombinatoryal bir tabana oturtur.

Genetik Algoritmaların Gıda Endüstrisindeki Uygulamaları

Meyvelerin fizyolojik tepkilerine dayalı olarak geliştirilen dinamik kontrol teknikleri, depolama süreçlerinde ürün kalitesinin korunmasında ve soğuk zincir optimizasyonunda kritik rol oynamaktadır. Morimoto ve ark. (1997) tarafından yapılan çalışmada, meyve depolama odalarındaki ortam koşullarını optimize etmek amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Genetik Algoritmaları (GA) içeren hibrit bir akıllı kontrol mimarisi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde, sisteme müdahale aracı (girdi) olarak bağıl nem (h) seçilirken; kontrol çıktıları olarak meyvede meydana gelen su kaybı ve fungal kontaminasyona bağlı lezyon gelişimi tanımlanmıştır.

Süreç iki temel aşamada yürütülmüştür: İlk olarak, bağıl nem dalgalanmalarından etkilenen su kaybı ve fungal enfeksiyon tepkileri YSA modelleriyle yüksek doğrulukta tanımlanmıştır. İkinci aşamada ise YSA modeli bir simülatör gibi kullanılarak, belirlenen amaç fonksiyonunu (minimum su kaybı ve lezyon gelişimi) maksimize edecek çok adımlı bağıl nem set değerleri GA optimizasyonu ile araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, gıda depolama süreçlerinin statik değil dinamik bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ve GA tabanlı akıllı sistemlerin bu optimizasyonda son derece efektif olduğunu ortaya koymuştur.

Isıl işlem teknolojilerinde, konserve gıdaların besinsel ve duyu kalitesini maksimumda tutarken işlem süresini kısaltmak amacıyla Değişken Otoklav Sıcaklığı (VRT) uygulamaları büyük önem taşımaktadır. Chen ve Ramaswamy (2002), ısıl işlem süreçlerini modellemek ve en uygun VRT koşullarını belirlemek adına yapay zeka tekniklerinden yararlanmışlardır. YSA modellerinin eğitilmesi amacıyla bilgisayar simülasyon programlarından sinüs ve üstel fonksiyon tabanlı dinamik veri setleri toplanmıştır. Çalışmada ortalama kalite koruma oranı (Q_v), toplam

işlem süresi (P_t) ve yüzey pişme değeri (F_s) bağımlı değişkenler olarak tanımlanmış ve bunları tahmin eden YSA modelleri kurulmuştur. Daha sonra bu eğitilmiş ağlar, belirlenen kısıtlamalar altında minimum işlem süresi ve minimum yüzey pişmesini hedefleyen bir GA mimarisi ile entegre edilmiştir. Kombine edilen YSA-GA modelinin, operasyonel değişkenler ile otoklav parametreleri arasındaki karmaşık ilişkileri başarıyla çözdüğü görülmüştür. VRT uygulamasının, geleneksel Sabit Otoklav Sıcaklığı (CRT) yöntemine kıyasla toplam üretim süresini %20'den fazla kısalttığı, yüzeydeki aşırı pişme kusurlarını ise %7 ila %10 oranında azalttığı rapor edilmiştir.

Tedarik zinciri ve üretim planlaması kapsamında, raf ömrü kısa olan hassas gıda maddelerinin satış tahminlerinin yapılması işletme ekonomisi açısından hayati bir zorunluluktur. Doganis ve ark. (2006) tarafından yürütülen çalışmada, doğrusal olmayan zaman serilerini analiz ederek geleceğe yönelik satış projeksiyonları oluşturabilecek bütünsel bir yapay zeka çerçevesi önerilmiştir. Bu metodoloji, Radyal Temel Fonksiyonlu (RBF) sinir ağı mimarisi ile bu ağın parametrelerini optimize etmek üzere özel olarak tasarlanmış bir GA entegrasyonundan oluşmaktadır. Geliştirilen hibrit model, ulusal ölçekte faaliyet gösteren büyük bir süt ürünleri firmasının taze içme sütü satış verilerine uygulanmış ve pazar taleplerini minimum hatayla tahmin etmeyi başararak üretim planlamasına doğrudan katkı sunmuştur.

Prediktif gıda mikrobiyolojisinde, gıda formülasyonlarındaki koruyucu bileşenlerin patojen veya bozucu mikroorganizmalar üzerindeki kombine etkilerini modellemek amacıyla YSA ve GA kombinasyonları etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Gimeno ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada; tuz (NaCl) konsantrasyonu, pH derecesi ve depolama sıcaklığının *Lactobacillus plantarum*'un gelişme eğrisi kinetikleri üzerindeki ortak etkilerini YSA ve Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) kullanarak modellemişlerdir. Modelleme performansını artırmak amacıyla büyüme eğrisine zaman faktörü ve optik yoğunluk (OD) değerleri de dahil edilmiştir. Çalışmada, ağın genelleme yeteneğini kaybetmesine neden olan gereksiz bağlantı ve ağırlıkların sistemden uzaklaştırılması süreci olan "ağ budama"

(pruning) yöntemi uygulanmıştır. En uygun ağ mimarisinin ve başlangıç ağırlık dağılımlarının belirlenmesinde GA kullanılmıştır. Geliştirilen GA destekli YSA modelinin tahmin hatası (Standart Tahmin Hatası - SEP), büyüme hızı parametresi için %14.04 olarak bulunurken, geleneksel RSM modelinin hatası %35.63 seviyesinde kalmıştır. Bu sonuçlar, yapay zeka tabanlı budama ve optimizasyon algoritmalarının mikrobiyolojik tahminlerde geleneksel istatistiksel modellere kıyasla çok daha üstün olduğunu kanıtlamıştır.

Fonksiyonel gıda bileşenlerinin gıda matrislerine optimizasyonu kapsamında, probiyotik soya peyniri (tofu) üretimi için en uygun işlem koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Deneysel verilerden hareketle öncelikle Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) ile matematiksel modeller kurulmuş; ardından bu modeller üzerinde Ardışık Kuadratik Programlama (SQP) ve GA çalıştırılarak karşılaştırmalı optimizasyon testleri yapılmıştır (Chen ve ark., 2005). Her iki teknik de probiyotik soya peyniri için en ideal formülasyon bileşenlerini; %1 glukono-delta-lakton (GDL), %0 peptit, %3 izomaltooligosakkarit (IMO) ve %18 süt konsantrasyonu olarak başarıyla tespit etmiştir. Doğrulama deneyleriyle de desteklenen bu çalışmada, çoklu çalıştırma parametreleri dikkate alındığında SQP tekniğinin GA'ya kıyasla operasyonel açıdan biraz daha verimli olduğu gözlenmiştir.

Hayvansal üretim hatlarında verimliliğin anlık takibi amacıyla, koyunların ilk laktasyon kontrollerinde elde edilen verilerden hareketle zamana bağlı süt üretim eğrilerinin modellenmesinde GA destekli sinir ağlarından yararlanılmıştır. Bu sayede hayvanların üretkenlik kapasiteleri çok daha erken evrelerde tanımlanabilmiş ve sürü yönetiminde yüksek verimli damızlıkların seçilmesi süreci hızlandırılmıştır. Evrensel yaklaşım yeteneğine sahip tek gizli katmanlı bir YSA mimarisinin kullanıldığı çalışmada, gizli katmandaki en ideal nöron sayısını bulmak için genetik ve budama algoritmaları kombine edilmiştir. Elde edilen sonuçların, klasik bir öğrenme algoritması olan Extended-Delta-Bar-Delta ve diğer geleneksel matematiksel modellere kıyasla çok daha yüksek bir uyum başarısı gösterdiği doğrulanmıştır (Torres ve ark., 2005).

Gıdalarda coğrafi işaret koruması ve orijin (köken) belirleme çalışmaları doğrultusunda, geleneksel İtalyan peyniri Ossolano'nun taklit ve tağşişinin önlenmesi amacıyla kemometrik bir model sunulmuştur. Çalışmanın temel amaçlarından biri, peynirlerin karakterizasyonu için yürütülen rutin laboratuvar analizlerinin sayısını azaltarak operasyonel maliyetleri düşürmektir. Bu doğrultuda; peynir matrisindeki yağ asitleri, elektroforetik ve kromatografik yöntemlerle elde edilen proteolitik profiller ile temel biyokimyasal parametreler YSA modeline girdi olarak verilmiştir. Sınıflandırma performansını düşüren, birbiriyle ilişkisiz veya önemsiz parametreleri sistemden ayıklamak (kesmek) amacıyla veri setine bir GA uygulanmıştır. GA optimizasyonu sayesinde, mevcut değişkenlerin sadece yarısı kullanılarak, önem derecelerine dair önceden hiçbir sübjektif varsayım yapılmaksızın, tüm değişkenlerle elde edilen başarı oranına eşdeğer düzeyde mükemmel bir orijin tanılama doğruluğu elde edilmiştir. Buna karşın, biyojenik aminler ve öncü amino asit profillerinin peynir orijinini ayırt etmede yetersiz kaldığı tespit edilmiştir (Barile ve ark., 2006).

Bulanık kontrolörlerin endüstriyel süreçlere adaptasyonunda karşılaşılan en büyük zorluk, üyelik fonksiyonlarının ve kural tabanlarının uzman kişilere bağımlı olarak sübjektif tasarlanmasıdır. Morimoto ve ark. (1997a) bu sorunu aşmak adına, YSA ve GA kullanarak en uygun üyelik fonksiyonlarını ve kontrol kurallarını otonom olarak seçen yenilikçi bir bulanık kontrol tekniği geliştirmiş ve sistemi bir meyve depolama odasının bağıl nem denetimine uygulamışlardır. Havalandırma sisteminin açma-kapama aksiyonlarından etkilenen bağıl nem tepkileri ilk aşamada YSA ile modellenmiş, ardından bu model bir simülatör görevi görerek GA vasıtasıyla en ideal bulanık üyelik fonksiyonlarını ve kural setlerini aramıştır. Geliştirilen GA-Bulanık kontrolörün, odadaki bağıl nemi hedef değerinde stabil tutma performansının geleneksel endüstriyel kontrolörlerden çok daha üstün olduğu kanıtlanmıştır.

Benzer bir YZ entegrasyonu, domateslerin hasat sonrası ısıtıl işlem (sıcaklık uygulamaları) modellerinin yüzey renk değişimlerine göre optimize edilmesinde kullanılmıştır. Süreçteki amaç fonksiyonu, domates kabuğundaki yeşilden kırmızıya dönüşüm

hızının ortalama değerinin kontrol edilmesi olarak tanımlanmıştır. İlk olarak, zamana ve sıcaklığa bağlı yüzey renk değişim dinamikleri YSA ile modellenmiş; ardından amaç fonksiyonunu maksimuma çıkaran çok adımlı sıcaklık set değerleri GA simülasyonlarıyla taranmıştır. Evrimsel süreç boyunca popülasyon çeşitliliğinin yüksek tutulması sayesinde sistem, iki farklı optimum ısıl işlem modeli üretmiştir: geleneksel tekli sürekli ısı uygulaması ve belirli periyotlarla uygulanan aralıklı (kesikli) ısı uygulaması. Gerçek prototip sistem üzerinde yapılan testlerde, elde edilen bu akıllı ısıl işlem modellerinin, meyve ve sebzelerin olgunlaşma süreçlerini soğuk zincir dinamikleriyle uyumlu şekilde optimize etmede son derece elverişli olduğu görülmüştür (Morimoto ve ark., 1997b).

Sıvı yağ teknolojisinde kritik bir proses olan hidrojenasyon esnasında, insan sağlığına zararlı toplam trans yağ asitleri izomerlerinin oluşumunu en aza indirmek ve yararlı cis-oleik asit miktarını maksimuma çıkarmak amacıyla YSA ve GA entegrasyonuna dayalı bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Pilot ölçekli bir reaktörden elde edilen geniş deneysel veri setleriyle öncelikle hidrojenasyon sürecini yüksek doğrulukla tahmin eden bir YSA modeli kurulmuştur. Ardından, bu ağ yapısı üzerine kurgulanan bir GA vasıtasıyla; minimum trans izomeri ve maksimum cis-oleik asit sentezini sağlayan en ideal proses parametresi kombinasyonları (sıcaklık, basınç, ajitasyon hızı, katalizör miktarı vb.) araştırılmıştır. GA tarafından tahmin edilen bu optimum işletme koşulları gerçek fabrika üretim ayarlarına uygulanmış; sonuçlar yapay zeka destekli bu şemanın bitkisel yağ hidrojenasyon endüstrisinde ürün kalitesi ve güvenliğini artırmada oldukça etkili bir araç olduğunu göstermiştir (Izadifar ve Jahromi, 2007).

Biyoteknolojik üretim süreçlerinde, yeni izole edilmiş bir *Pseudomonas* sp. RAJR 044 suşu kullanılarak kesikli-beslemeli (fed-batch) kabarcık kolon biyoreaktöründe proteaz enzimi üretiminin optimizasyonu incelenmiştir. Mikroorganizma; buğday kepeği ve tek karbon kaynağı olarak sükroz içeren Czapek-Dox besiyerinde kültüre edilmiştir. Biyoproses parametrelerinin modellenmesinde hata kareler ortalamasının kökü (RMSE) %2 olan

güçlü bir matematiksel model kurgulanmış ve optimizasyon görevi için GA kullanılmıştır. Son derece esnek bir küresel optimizasyon aracı olan GA; reaktördeki toplam reaksiyon süresini en aza indirirken, hedef ürün (proteaz) konsantrasyonunu maksimize etmek üzere çalıştırılmıştır. Optimize edilen bu proses koşulları gerçek deneysel ortamda doğrulanmış ve tahmin hatasının %3 gibi son derece kabul edilebilir bir düzeyde gerçekleştiği belirlenmiştir (Dutta ve ark., 2005).

Şarap endüstrisinde objektif kalite değerlendirmeleri yapabilmek adına; amperometrik bir elektronik dil, ticari bir elektronik burun ve spektrofotometrik ölçüm teknikleri kombine edilerek kırmızı şarapların duyuşal tanımlayıcılarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çok değişkenli bu veri havuzundan en anlamlı optik ve elektrokimyasal değişkenleri seçmek ve kararlı tahmine dayalı regresyon modelleri oluşturmak amacıyla GA kullanılmıştır. Oluşturulan modellerin güvenilirliği Bootstrap çapraz doğrulama prosedürü ve Williams grafiksel hata analizleriyle denetlenmiştir. Geliştirilen GA tabanlı regresyon modellerinin, şarapların duyuşal panel verilerinin büyük bir kısmını objektif ve hızlı bir şekilde tahmin edebildiği kanıtlanmıştır; sistemin sadece "ekşilik" tanımlayıcısı için kabul edilebilir bir regresyon modeli oluşturamadığı rapor edilmiştir (Buratti ve ark., 2007).

Son yıllarda G'nın gıda endüstrisindeki uygulamalarına bakacak olursak, özellikle çeşitli kurutma ve dehidrasyon proseslerinde GA'nın YSA ile birlikte kullanılması, proses koşullarının optimize edilmesine, ürün kalitesinin artırılmasına ve enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamıştır (Winiczenko ve ark., 2021; Yang ve ark., 2023). Bunun yanı sıra, GA gıda tedarik zincirlerinin, ulaşım rotalarının ve bozulabilir ürünlere yönelik lojistik sistemlerin optimizasyonunda kullanılarak atıkların azaltılmasına ve sürdürülebilirlik performansının iyileştirilmesine olanak tanımıştır (Anndrei ve ark., 2023; Mili ve ark., 2026). Ayrıca, gıda ürünü geliştirme süreçlerinde ve tüketici tercihlerinin modellenmesinde GA tabanlı optimizasyon yaklaşımlarından yararlanılarak, üreticilerin pazar taleplerini daha doğru karşılayan ve tüketici beklentilerine daha uygun ürünler tasarlamaları mümkün

hale gelmiştir (Gastrograph AI, 2021). Bu çalışmalar, GA'nın gıda endüstrisinde proses performansının iyileştirilmesi, karar verme süreçlerinin desteklenmesi ve kaynak kullanım etkinliğinin artırılmasında önemli bir yapay zekâ aracı olduğunu göstermektedir.

YZ Uygulamalarının Gıda Güvenliği, Kalite Kontrol ve Sürdürülebilirlik Üzerine Etkileri

YZ gıda güvenliğinde mikrobiyal risk analizi, kontaminasyon tespiti, gıdaların izlenebilirliği ve tedarik zinciri takibinde ve prediktif ve önleyici gıda güvenliği risklerinin yönetiminde önemli potansiyel taşımaktadır. YZ modelleri farklı çevresel koşullar altında mikrobiyal gelişim ve canlılığı tahmin edebilmektedir (Haykin, 2014).

Makine öğrenmesi algoritmalarının spektral görüntüleme, biyosensörler ve makine görüntüleme sistemlerine entegrasyonu mikrobiyal bulaşma, yabancı madde ve kimyasal tehlikeler hızlı bir şekilde tespit edilebilmektedir (Lopez ve ark., 2026).

YZ tabanlı izlenebilirlik sistemleri gıda tedarik zincirinde şeffaflık sağlamaktadır. YZ blok zincir (block chain) ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojileri ile birleştirildiğinde kontaminasyon kaynaklarını ve gıda güvenliği risklerini öngörebilir ve ürün geri çağırma süreçlerinin hızlı ve etkin bir şekilde yönetilmesini destekleyebilir (Lopez ve ark., 2026).

Prediktif analitik yöntemler gıda üreticilerinin riskler oluşmadan önce kontaminasyonu önlemesini sağlayabilir. YZ modelleri geçmiş üretim data'ları ve tedarik zinciri bilgileri üzerinden önleyici tahminlerde bulunabilmektedir (Ikram ve ark., 2024).

YZ destekli görüntüleme sistemleri gıdalarda renk, tekstür, şekil ve yüzey kusurları gibi parametreleri hızlı ve yüksek doğrulukla tespit edebilir (Liakos ve ark., 2025). Bu teknolojiler meyve, sebze, tahıl, süt ürünleri, et ve deniz ürünlerinin kalite kontrolü ve sınıflandırılmasında etkili bir şekilde kullanılabilir (Yang ve ark., 2025).

Gıdaların aroma, tat ve tüketici kabul edilebilirliğinin belirlenmesinde eletronik burun, elektronik dil ve makine öğrenmesi modelleri giderek daha yaygın kullanılmaktadır (Liakos ve ark., 2025). Bu teknolojiler geleneksel duyuşal panellerde karşılaşılabilen sübjektifliğı önlemektedir.

Makine öğrenmesi modelleri fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve çevresel dataları analiz ederek raf ömrü tahmininde bulunabilir (Yang ve ark., 2022). Doğru raf ömrü tahmini ürün güvenliğini sağılarken gıda israfını önler (Dhal ve ark., 2025).

YSA ve GA termal prosesleri, fermentasyon, kurutma dondurma ve strelizasyon gibi proseslere etkili bir şekilde uygulanarak proses verimliliğı ve ürün kalitesini temin etmektedir (Yang ve ark., 2025).

Gıda atıkları sürdürülebilirlik açısından önemli bir evrensel sorundur. YZ teknolojilerinin gelişmiş talep tahminleri, envanter yönetimi, raf ömrü tahmini ve lojistik optimizasyonu gıda atıklarının önemli seviyede düşürölmesine katkı sağılayabilir (Dhal ve ark., 2025). YZ su, enerji, hammadde tüketiminde optimizayon sağılamaktadır. Akıllı üretim sistemleri kaynak tüketimini düşürürken üretkenliğı artırmaktadır. YZ rota optimizasyonu, talep tahmini ve envanter kontrolü ile nakliye emisyonlarının düşürölmesini sağılar ve genel tedarik zinciri verimliliğini artırır (Ikram ve ark., 2024). Gıda yan ürünlerinin değıerlendirilmesi ve atık yönetiminde de YZ desteğı sürdürülebilirliğe katkı sağılamaktadır (Dhal ve ark., 2025).

YZ entegrasyonunun gıda güvenliğı, kalite kontrol ve sürdürülebilirlik üzerine uygulamaları Tablo 3’de özetlenmiştir.

Tablo 3 Gıda güvenliği, kalite kontrol ve sürdürülebilirlik üzerine YZ uygulamaları

Gıda Güvenliğinde YZ uygulamaları	Uygulama	Örnek makaleler
1. Mikrobiyal risk belirleme	Mikrobiyal gelişim ve canlılık tahmini, mikotoksin tespiti	Leuconostoc mesenteroides gelişimini YSA ile modelleme (Garcia-Gimeno ve ark., 2005) Yersinia enterocolitica gelişiminin bulanık mantık kullanılarak belirlenmesi (Sofu ve Ekinci, 2007) Hiperspektral görüntüleme ve derin öğrenme algoritmaları ile mısırdaki küflenme tespiti (Yang ve ark., 2022) Üzümde mantar bozulmalarının erken tespiti için <i>E. coli</i> biyobelirteci (Ma ve ark., 2023)
2. Kontaminasyon tespiti	Mikrobiyal, yabancı madde ve kimyasal kontaminasyonların spektral görüntüleme, biyosensörler ve makine görüntüleme ile hızlı tespiti	Makine öğrenimini ve yakın kızılötesi spektral analizle Robusta yeşil kahve çekirdeğindeki <i>Aspergillus ochraceous</i> kontaminasyonunun hızlı tespiti (Ruttanadech ve ark., 2023) Yağdaki aflatoksin B1'in kontaminasyon derecesi ve düzeyini izlemek için Raman spektrumuna dayalı derin öğrenme modellerinin uygulanması (Deng ve ark., 2023) Çiğ sütte antibiyotiklerin bir nanobiyosensör absorpsiyon spektrasının makine öğrenimi ile analiz edilerek hızlı tespiti (Gutierrez ve ark., 2020)
3. Gıda izleme ve tedarik zinciri takibi	YZ destekli izlenebilirlik sistemleri ile gıda tedarik zinciri takibi	Meyve ve sebze tedarik zincirinde bilgi ve iletişim teknolojilerinin uygulanması (Yuvaraj ve ark., 2023)
4. Tahmine Dayalı Gıda Güvenliği Yönetimi	Olası kontaminasyon risklerinin YZ modelleri ile önceden	Yapay Zeka, Büyük Veri ve Nesnelerin İnterneti'nin Gıda Güvenliği Erken Uyarı ve Gelişen Risk Tanımlama Araçlarına Dahil Edilmesiyle Gıda Sistemlerini Gıda

	tahmin edilerek gerekli önleyici tedbirlerin uygulanması	Güvenliği Risklerine Karşı Daha Dayanıklı Hale Getirme (Mu ve ark., 2024)
Kalite Kontrolde YZ uygulamaları	Uygulama	Örnek makaleler
1. Otomatik denetim sistemleri	Bilgisayarlı görüntü işleme teknolojileri ile renk, tekstür ve şekil ve yüzey özellikleri ve kusurlarının belirlenmesi	Kuru incir otomatik kalite kontrolünde bilgisayarlı görüntü işleme (Benalia ve ark., 2016) Bilgisayarlı görüntüleme ve derin öğrenme teknolojileri ile domates yüzey kusurları tespiti (da Costa ve ark., 2020) Bilgisayarlı görüntüleme ve YSA ile fasulyelerin sınıflandırılması (Kılıç ve ark., 2007a) Karidesin kalite özelliklerinin bilgisayarlı görüntüleme ile tespiti (Luzuriaga ve ark., 1997)
2. Duyusal kalite tespiti	Tat, aroma, koku, tekstür gibi karakteristiklerin elektronik burun, elektronik dil ve makine öğrenme teknolojileri ile belirlenmesi	Gıdaların duysal değerlendirmesinde YZ (Jo ve ark., 2025) Kırmızı şarabın GA regresyon modelleri aracılığıyla elektronik burun ve dil ve spektrofotometrik yöntemlerle duysal analizi (Buratti ve ark., 2007) Makine görüntüleme ve elektronik burun kullanılarak kabak dilimlerinde ve yaban mersininde duysal kalite ve koku üzerine çalışmalar (Demir ve ark. 2002a, 2002b)
3. Raf ömrü tahmini	Fizikokimyasal, mikrobiyal ve çevresel parametrelerin analizi ile doğru raf ömrü tahminleri	Çeşitli gıda gruplarının raf ömrü tahmininde YZ (Rashvand ve ark., 2025)

4. Proses optimizasyonu	Isıl işlem, fermentasyon, kurutma, dondurma ve strelizasyon gibi proseslerin optimizasyonu	Bitkisel yağ hidrojenizasyonunun optimizasyonunda GA (Izadefar ve Jahoromi, 2007) Et işlemede yapay zeka tekniklerinin uygulanması (Wang ve Li., 2024). Gıda işleme ve paketlemede YZ (Vasudevan ve ark., 2024)
Sürdürülebilirlik için YZ uygulamaları	Uygulama	Örnek makaleler
1. Gıda atıklarının azaltılması	Raf ömrü tahmini, talep tahmini, envanter yönetimi, lojistik optimizasyonu	Tarımsal gıda tedarik zincirinde aşırı üretimi ve gıda israfını azaltmak için YZ destekli talep tahmini (Suliman ve ark., 2025) Meyve sebzelerin raf ömrünü uzatma ve tahminde makine öğrenmesi (Li ve ark., 2024)
2. Kaynakların verimli kullanılması	Su ve enerji tüketimi optimizasyonu ve hammadde değerlendirme	YZ ve 3-D yazıcı kullanılarak yeni protein kaynaklarının değerlendirilmesi (Bedoya ve ark., 2022)
3. Sürdürülebilir tedarik zinciri	Rota optimizasyonu, talep tahmini, envanter kontrolü	Tedarik zinciri yönetiminin YZ yoluyla optimize edilmesi: tahmine dayalı bakım, talep tahmini ve envanter optimizasyonu teknikleri (Reddy ve ark., 2021) Döngüsel gıda tedarik zincirlerinde Endüstri 4.0 teknolojileri (Bansal, 2025)
4. Döngüsel ekonomi uygulamaları	Gıda yan ürünlerinin değerlendirilmesi, atık yönetimi stratejileri, döngüsel üretim sistemleri	Gıda israfıyla mücadele etmek ve döngüsel ekonomiyi geliştirmek için yapay zekanın kullanılması: Kaynak verimliliğinin en üst düzeye çıkarılması ve çevresel etkinin en aza indirilmesi (Onyeake ve ark., 2023) Yeni nesil atık yönetim sistemleri için yapay zeka ve makine öğrenimi teknikleri (Kumar, 2025)

Sonuç ve Öneriler

Son yıllarda bilgi ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan baş döndürücü gelişmeler, diğer mühendislik disiplinlerinde olduğu gibi Gıda Mühendisliği teorisi ve endüstriyel uygulamalarında da köklü bir paradigma değişimine yol açmaktadır. İnsan zekasına, öğrenme, mantık yürütme, esnek karar verme ve optimizasyon kabiliyetlerine özgü donanımları gelişmiş algoritmalar vasıtasıyla bilgisayar sistemlerine aktaran Yapay Zeka (YZ) uygulamaları; gıda sanayinin karşı karşıya olduğu yüksek derecede doğrusal olmayan, heterojen ve karmaşık pek çok biyoproses probleminin çözümünde rüştünü ispat etmiştir.

Bu derleme çalışması kapsamında incelenen literatür verilerinin ışığında; Yapay Sinir Ağları (YSA), Bulanık Mantık (FL) ve Genetik Algoritmalar (GA) gibi akıllı sistemlerin gıda endüstrisinde;

- Hammaddelerin ve son ürünlerin objektif, hızlı ve tahribata uğramadan sınıflandırılmasında,
- Zaman alıcı klasik mikrobiyolojik ve kimyasal analizlerin yerine çevrimiçi (on-line) tahminleme ve yumuşak sensör (soft-sensing) uygulamalarının geliştirilmesinde,
- Isıl işlem, fermantasyon ve kurutma gibi operasyonlarda enerji verimliliğini artırıp maliyetleri düşürecek proses modelleme ve küresel optimizasyon süreçlerinde,
- Gıda güvenliği risk düzeylerinin belirlenmesi ve pazar talep tahminlerinin yapılarak stratejik yönetim mekanizmalarının kurulmasında son derece kısa sürede ve yüksek doğrulukla çözümler ürettiği görülmektedir.

Teknolojinin her geçen gün ivmelenerek ilerlemesi, endüstride dijitalleşme ve yeşil dönüşüm (Twin Transition) gerekliliklerinin artması ve YZ modellerinin konvansiyonel yöntemlere kıyasla çok daha sürdürülebilir, ekonomik ve güvenilir sonuçlar vermesi sebebiyle; önümüzdeki dönemde gıda mühendisliği eğitimi, AR-GE

faaliyetleri ve endüstriyel gıda teknolojisi uygulamalarında bu yenilikçi yaklaşımlara olan akademik ve sektörel ilginin katlanarak artacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

Abbasi, H., Ardabili, S. M. S., Emam-Djomeh, Z., Mohammadifar, M. A., Zekri, M., & Aghagholizadeh, R. (2012). Prediction of extensograph properties of wheat-flour dough: Artificial neural networks and a genetic algorithm approach. *Journal of Texture Studies*, 43(4), 326–337. [Doi: 10.1111/j.1745-4603.2011.00342.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2011.00342.x)

Abdurrahman, E. E. M., & Ferrari, G. (2025). Digital twin applications in the food industry: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, Article 1538375. [Doi: 10.3389/fsufs.2025.1538375](https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1538375)

Abiyeva, R. H., Uyar, K., Ilhan, Ü., & Imanov, E. (2016). Assessment of food security risk level using type 2 fuzzy system. *Procedia Computer Science*, 102, 547–554. [Doi: 10.1016/j.procs.2016.09.441](https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.441)

Akgül, N. A., Akgül, F. Y., & Tuna, D. (2014). Bulanık mantık ile kefir üretiminin modellenmesi. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(6), 251–255. [Doi: 10.24925/turjaf.v2i6.251-255.75](https://doi.org/10.24925/turjaf.v2i6.251-255.75)

Aliyeva, E., Rzayeva, I., & Askerova, N. (2017). Fuzzy cognitive model development for monitoring of results and reporting within the UN FAO food security program. *Procedia Computer Science*, 120, 430–437. Doi: 10.1007/978-3-030-04164-9_80

Anndrei, A. R. D., & Garcia-Lopez, Y. J. (2023). Application of genetic algorithms to optimize distribution in food transport companies: A systematic literature review. In *Proceedings of the 3rd Indian International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 277–287). IEOM Society International. [Doi: 10.46254/IN03.20230032](https://doi.org/10.46254/IN03.20230032)

Bansal, P., Karassin, O., & Dora, M. (2026). Industry 4.0 technologies in circular food supply chains: A systematic literature review. *Journal of Circular Economy*, 3(2), 127–151. [Doi: 10.55845/joce-2025-32101](https://doi.org/10.55845/joce-2025-32101)

Barile, D., Coisson, J. D., Arlorio, M., & Rinaldi, M. (2006). Identification of production area of Ossolano Italian cheese with chemometric complex approach. *Food Control*, 17(3), 197–206. [Doi: 10.1016/j.foodcont.2004.10.016](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.10.016)

Basak, S. (2018). The use of fuzzy logic to determine the concentration of betel leaf essential oil and its potency as a juice preservative. *Food Chemistry*, 240, 1113–1120. [Doi: 10.1016/j.foodchem.2017.08.047](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.047)

Bedoya, M.G., Montoya, D.R., Tabilo-Munizaga, G., Pérez-Won, M., and Lemus-Mondaca, R. 2022. Promising perspectives on novel protein food sources combining artificial intelligence and 3D food printing for food industry. *Trends Food Sci Technol*. 128:38–52. [Doi: 10.1016/j.tifs.2022.05.013](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.05.013)

Benalia S.CuberoS.Prats-Montalbán J.M. Bernardi B.Zimbalatti G.BlascoJ. (2016). Computer vision for automatic quality inspection of dried figs (*Ficus carica* L.) in real-time. *Comput. Electron. Agric.*120, 17–25. [Doi: 10.1016/j.compag.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.002)

Birle, S., Hussein, M. A., & Becker, T. (2013). Fuzzy logic control and soft sensing applications in food and beverage processes. *Food Control*, 29(1), 254–269. [Doi: 10.1016/j.foodcont.2012.06.011](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.06.011)

Buratti, S., Ballabio, D., Benedetti, S., & Cosio, M. S. (2007). Prediction of Italian red wine sensorial descriptors from electronic nose, electronic tongue and spectrophotometric measurements by means of genetic algorithm regression models. *Food Chemistry*, 100(1), 211–218. [Doi: 10.1016/j.foodchem.2005.09.040](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.040)

Chao, K., Mehl, P. M., & Chen, Y. R. (2002). Use of hyper- and multi-spectral imaging for detection of chicken skin tumors. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(1), 113–119.

Chen, C. R., & Ramaswamy, H. S. (2002). Modeling and optimization of variable retort temperature thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms. *Journal of Food Engineering*, 53(3), 209–220.

Chung, C., Chen, H., & Ting, C. (2010). Grey prediction fuzzy control for pH processes in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 96(4), 575–582.

Cimander, C., Carlsson, M., & Mandenius, C. F. (2002). Sensor fusion for on-line monitoring of yoghurt fermentation. *Journal of Biotechnology*, 99(3), 237–248.

Clotz, C. (2025). Design and implementation of a fuzzy logic-based automated food dryer. In Proceedings of the SAUPEC Conference

Codină, G. G., Dabija, A., & Oroian, M. (2019). Prediction of pasting properties of dough from Mixolab measurements using artificial neuronal networks. *Foods*, 8(10), 447. <https://doi.org/10.3390/foods8100447>

Davidson, V. J., Ryks, J., & Fazil, A. (2006). Fuzzy risk assessment tool for microbial hazards in food systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(9), 1201–1210.

Demir, N., Balaban, M. O., Brecht, J. K., Sims, C. A., & Gülay, M. S. (2002a). Objective quality assessment of modified atmosphere stored zucchini slices using electronic nose, machine vision, and Instron. In Proceedings of the Annual International Meeting of ASAE.

Demir, N., Ferraz, C. O., Sargent, S. A., & Balaban, M. O. (2002b). Determination of odor changes in bruised blueberries

during storage using an electronic nose. In Proceedings of the Annual International Meeting of ASAE.

Demiral, M. F. (2013). Bulanık doğrusal programlama ile süt endüstrisinde bir uygulama. Süleyman Demirel Üniversitesi *İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(2), 373–397.

Deng, J.; Zhang, X.; Li, M.; Jiang, H.; Chen, Q. (2023). Feasibility study on Raman spectra-based deep learning models for monitoring the contamination degree and level of aflatoxin B1 in edible oil. *Microchem. J.*, 180, 107613.

da Costa A. Z.FigueroaH. E. H.FracarolliJ. A. (2020). Computer vision based detection of external defects on tomatoes using deep learning. *Biosyst. Eng.* 190, 131–144. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.12.003

Doganis, P., Alexandridis, A., Patrinos, P., & Sarimveis, H. (2006). Time series sales forecasting for short shelf-life food products based on artificial neural networks and evolutionary computing. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 196–204.

Dhal, Sambandh & Kar, Debashish. (2025). Leveraging artificial intelligence and advanced food processing techniques for enhanced food safety, quality, and security: a comprehensive review. *Discover Applied Sciences*. 7. Doi: 10.1007/s42452-025-06472-w.

Dutta, J., Dutta, P., & Banerjee, R. (2005). Modeling and optimization of protease production by a newly isolated *Pseudomonas* sp. using a genetic algorithm. *Process Biochemistry*, 40(3–4), 879–884.

Ellis, D. I., Broadhurst, D., & Goodacre, R. (2004). Rapid and quantitative detection of the microbial spoilage of beef by Fourier transform infrared spectroscopy and machine learning. *Analytica Chimica Acta*, 514(2), 193–201.

Garcia-Gimeno, R. M., Hervás-Martínez, C., Rodríguez-Pérez, R., & Zurera-Cosano, G. (2005). Modelling the growth of *Leuconostoc mesenteroides* by artificial neural networks. *International Journal of Food Microbiology*, 105(3), 317–332.

Gastrograph AI (2021). Predictive food and beverage product development platform. Analytical Flavor Systems. <https://www.insightplatforms.com/platforms/gastrograph-ai/>

Gimeno, R., Martínez, C., & Silóniz, M. (2002). Improving artificial neural networks with a pruning methodology and genetic algorithms for their application in microbial growth prediction in food. *International Journal of Food Microbiology*, 72(1–2), 19–30.

Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley.

Gonçalves, E. C., Minim, L. A., Coimbra, J. S. R., & Minim, V. P. R. (2005). Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks. *Chemical Engineering and Processing*, 44(12), 1269–1276.

Guillaume, S.,ve & Charnomordic, B. (2000). Knowledge discovery for control purposes in food industry databases. *Fuzzy Sets and Systems*, 122(3), 487–497.

Gutiérrez, P., Godoy, S. E., Torres, S., Oyarzún, P., Sanhueza, I., Díaz-García, V., Contreras-Trigo, B., & Coelho, P. (2020). Improved antibiotic detection in raw milk using machine learning tools over the absorption spectra of a problem-specific nanobiosensor. *Sensors*, 20(16), 4552. [Doi: 10.3390/s20164552](https://doi.org/10.3390/s20164552)

Haykin, S. (2014). Neural networks and learning machines (3rd ed.). Pearson Education

Hosseinpour, S., & Martynenko, A.I. (2022). An adaptive fuzzy logic controller for intelligent drying. *Drying Technology*, 41, 1110 - 1132.

Hussain, M. A., Shafiur Rahman, M., & Ng, C. W. (2002). Prediction of pores formation (porosity) in foods during drying: Generic models by the use of hybrid neural network. *Journal of Food Engineering*, 51(3), 239–248.

Ikram, A., Mehmood, H., Arshad, M.T., Rasheed, A., Noreen, S., and Gnedeka, K.T. (2024). Applications of artificial intelligence (AI) in managing food quality and ensuring global food security. *CyTA J Food*. 22(1):1–15, Article 2393287. 10.1080/19476337.2024.2393287

Izadifar, M., & Jahromi, M. Z. (2007). Application of genetic algorithm for optimization of vegetable oil hydrogenation process. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 1–8.

Jafari, S. M., Ganje, M., Dehnad, D., & Ghanbari, V. (2016). Mathematical, fuzzy logic and artificial neural network modeling techniques to predict drying kinetics of onion. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(2), 329–339.

Jahns, G., Nielsen, H. M., & Paul, W. (2001). Measuring image analysis attributes and modelling fuzzy consumer aspects for tomato quality grading. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(1), 17–29.

Jo, D.-M., Han, S.-J., Ko, S.-C., Kim, K. W., Yang, D., Kim, J.-Y., Oh, G.-W., Choi, G., Lee, D.-S., Tabassum, N., Kim, Y.-M., & Khan, F. (2025). Application of artificial intelligence in the advancement of sensory evaluation of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 165, 105283. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105283>

Karakuzu, C., Türker, M., & Öztürk, S. (2006). Modelling, on-line state estimation and fuzzy control of production-scale fed-batch baker's yeast fermentation. *Control Engineering Practice*, 14(8), 959–974. [Doi: 10.1016/j.conengprac.2005.05.007](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2005.05.007)

Kavas, G. (2012). Gıdalarda yapay sinir ağıları ve bulanık mantık. *Dünya Gıda Dergisi*. <http://www.dunyagida.com.tr/kose-yazisi/gidalarda-yapay-sinir-aglari-ve-bulanik-mantik/1043>

Kılıç, K., Boyacı, İ. H., Köksel, H., & Küçümenoğlu, A. (2007a). A classification system for beans using computer vision system and artificial neural networks. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 897–904.

Kılıç, K., Önal-Ulusoy, B., & Boyacı, İ. H. (2007b). A novel method for color determination of edible oils in Lab* format. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(2), 157–164.

Kılınç, B., Kılınç, İ., Takma, Ç., ve Gevrekçi, Y. (2024). The applications of fuzzy logic models on food and marine food products. *Journal of Food Safety and Food Quality*, 75(2), 52-63. <https://doi.org/10.53194/0003-925X-75-52>

Kumar, N. (2025). Artificial intelligence and machine learning techniques for next-generation waste management systems: An overview. *Cureus Journal of Computer Science*, 2, eS44389. <https://doi.org/10.7759/s44389-025-04880-y>

Leemans, V., Magein, H., & Destain, M. F. (1998). Defects segmentation on Golden Delicious apples by using colour machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 20(2), 117–130.

Li, D., Bai, L., Wang, R., & Ying, S. (2024). Research Progress of Machine Learning in Extending and Regulating the Shelf Life of Fruits and Vegetables. *Foods*, 13(19), 3025. <https://doi.org/10.3390/foods13193025>

Liao, K., Paulsen, M. R., Reid, J. F., Ni, B. C., & Bonifacio-Maghirang, E. P. (1993). Corn kernel breakage classification by machine vision using a neural network classifier. *Transactions of the ASAE*, 36(6), 1949–1953.

Liakos, K. G., Athanasiadis, V., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2025). Machine Learning for Quality Control in the Food Industry: A Review. *Foods*, 14(19), 3424. [Doi: 10.3390/foods14193424](https://doi.org/10.3390/foods14193424)

López, M. A., Bouzembrak, Y., & Tekinerdogan, B. (2026). Artificial intelligence in food safety: A tertiary study. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 25(2), e70443. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70443>

Luzuriaga, D., Balaban, M. O., & Yeralan, S. (1997). Analysis of visual quality attributes of white shrimp by machine vision. *Journal of Food Science*, 62(1), 113–118.

Ma, J., Guan, Y., Liu, Y., Wang, G., Tai, B., & Xing, F. (2023). Assessment of Escherichia coli bioreporters for early detection of fungal spoilage in postharvest grape berries. *Postharvest Biology and Technology*, 204, 112481.

Malekjani, N., Jafari, S. M., Rahmati, M. H., Zadeh, E. E., & Mirzaee, H. (2013). Evaluation of thin-layer drying models and artificial neural networks for describing drying kinetics of canola seed in a heat pump-assisted fluidized bed dryer. *International Journal of Food Engineering*, 9(4), 375–384.

Mavani, N., Mohd Ali, J., Abd. Rahman, N. et al. Fuzzy logic-based approach for porcine DNA determination in meat products. *npj Sci Food* 9, 186 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00548-y>

Mittal, G. S., & Zhang, J. (2000). Prediction of freezing time for food products using a neural network. *Food Research International*, 33(7), 557–562.

Mili, K., & Argoubi, M. (2026). Stochastic optimization of perishable agricultural supply chains: A hybrid genetic algorithm approach for robust network design under multi-dimensional

uncertainty. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10, 1807797. Doi: 10.3389/fsufs.2026.1807797

Morimoto, T., De Baerdemaeker, J., & Hashimoto, Y. (1997a). An intelligent approach for optimal control of fruit-storage process using neural networks and genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 18(2–3), 205–224.

Morimoto, T., Purwanto, W., Suzuki, J., & Hashimoto, Y. (1997b). Optimization of heat treatment for fruit during storage using neural networks and genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 19(1), 87–101.

Morimoto, T., Suzuki, J., & Hashimoto, Y. (1997). Optimization of a fuzzy controller for fruit storage using neural networks and genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 10(5), 453–461.

Movagharnejad, K., & Nikzad, M. (2007). Modeling of tomato drying using artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 59(1–2), 78–85.

Mu, W., Kleter, G. A., Bouzembrak, Y., Dupouy, E., Frewer, L. J., Al Natour, F. N. R., & Marvin, H. J. P. (2024). Making food systems more resilient to food safety risks by including artificial intelligence, big data, and internet of things into food safety early warning and emerging risk identification tools. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), e13296. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13296>

Nazghelichi, T., Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Omid, M. (2010). Prediction of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying using artificial neural networks. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 274–280

Onyeaka, H., Tamasiga, P., Nwauzoma, U. M., Miri, T., Juliet, U. C., Nwaiwu, O., & Akinsemolu, A. A. (2023). Using

artificial intelligence to tackle food waste and enhance the circular economy: Maximising resource efficiency and minimising environmental impact—A review. *Sustainability*, 15(13), 10482. <https://doi.org/10.3390/su151310482>

Öztemel, E. (2012). Yapay sinir ağları. Papatya Yayıncılık

Park, B., Chen, Y. R., Nguyen, M., & Hwang, H. (1996). Characterizing multispectral images of tumorous, bruised, skin-torn, and wholesome poultry carcasses. *Transactions of the ASAE*, 39(5), 1933–1941.

Patnaik, P. R. (1997). Application of fuzzy logic for state estimation of a microbial fermentation with dual inhibition and variable product kinetics. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*, 75, 239–244.

Purlis, E. (2024). Digital twin methodology in food processing: Basic concepts and applications. *Current Nutrition Reports*, 13(4), 914–920. <https://doi.org/10.1007/s13668-024-00583-z>

Raj, A. S., Badgujar, C., Lollato, R. P., Prasad, P. V. V., et al. (2024). Predicting rheological properties of wheat dough from flour properties using NIR coupled with artificial neural network. *Journal of the ASABE*, 67(4), 1023–1035

Rashvand, M., Ren, Y., Sun, D.W., Senge, J., Krupitzer, C., Fadji, T., Miró, M.S., Shenfield, A., Watson, N.J., and Zhang, H. (2025). Artificial intelligence for prediction of shelf-life of various food products: recent advances and ongoing challenges. *Trends Food Sci Technol*. 159:1–44, Article 104989. 10.1016/j.tifs.2025.104989

Razmi-Rad, E., Ghanbarzadeh, B., Mousavi, S. M., Emam-Djomeh, Z., & Khazaei, J. (2007). Prediction of rheological properties of Iranian bread dough from chemical composition of

wheat flour by using artificial neural networks. *Journal of Food Engineering*, 81(4), 728–734.

Reddy G. Ramswaroop S. Yellu R. Thuniki P. (2021). Optimizing supply chain management through artificial intelligence: techniques for predictive maintenance, demand forecasting, and inventory optimization. *J. AI-Assisted Sci. Discovery* 1, 129–144.

Ruan, R., Almaer, S., & Zhang, J. (1995). Prediction of dough rheological properties using neural networks. *Cereal Chemistry*, 72(3), 308–311.

Russell, S., ve Norvig, P. (2020). Artificial intelligence: A modern approach (4th ed.). Pearson.

Ruttanadech, N.; Phetpan, K.; Srisang, N.; Srisang, S.; Chungcharoen, T.; Limmun, W.; Youryon, P.; Kongtragoul, P. Rapid and accurate classification of *Aspergillus ochraceus* contamination in Robusta green coffee bean through near-infrared spectral analysis using machine learning. *Food Control* 2023, 145, 109446.

Rywotycki, R. (2003). Food frying process control system. *Journal of Food Engineering*, 59(4), 339–342.

Şahin, M. A., Tollner, E. W., & McClendon, R. W. (2001). Artificial intelligence classifiers for sorting apples based on watercore. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79(3), 265–274.

Singh, V., Haque, S., Niwas, R., Srivastava, A., Pasupuleti, M., & Tripathi, C. K. M. (2017). Strategies for fermentation medium optimization: An in-depth review. *Frontiers in Microbiology*, 7, 2087.

Sipos, A., Bányai, T., & Tamás, P. (2021). Using neural networks to obtain indirect information about state variables in alcoholic fermentation processes. *Processes*, 9(1), 74.

Sofu, A. (2006). Yoğurtların depolama esnasında mikrobiyal ve kimyasal değişimlerinin bilgisayarlı görüntüleme sistemiyle belirlenmesi ve elde edilen verilerin yapay sinir ağlarıyla değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi.

Sofu, A., Demir, N., & Ekinci, F. Y. (2007). Gıda bilimi ve teknolojisi alanında yapay zekâ uygulamaları. *Gıda*, 32(2), 93–99.

Sofu, A., & Ekinci Kitiş, F. Y. (2005). Predicting survival rate of *Yersinia enterocolitica* in Turkish feta cheese during maturation and storage by using fuzzy logic modelling. In Proceedings of the 1st International Food and Nutrition Congress: Food Safety (İstanbul, Türkiye).

Suliman, S. I., Mohamad, R., & Shahbudin, S. (2025). AI-powered demand forecasting to reduce overproduction and food waste in the agri-food supply chain. In 2025 IEEE International Conference on Agrosystem Engineering, Technology & Applications (AGRETA)

Sun, D. W., & Brosnan, T. (2003a). Pizza quality evaluation using computer vision—Part 1: Pizza base and sauce spread. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 81–89.

Sun, D. W., & Brosnan, T. (2003b). Pizza quality evaluation using computer vision—Part 2: Pizza topping analysis. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 91–95.

Talon, R., Walter, D., Viallon, C., & Berdagué, J. L. (2002). Prediction of *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* populations in yoghurt by Curie-point pyrolysis mass spectrometry. *Journal of Microbiological Methods*, 48(2–3), 271–279.

Taner, A., Tekgüler, A., Sauk, H., & Demirel, B. (2012). Yulaf çeşitlerinin yapay sinir ağları kullanılarak sınıflandırılması. In 27.

Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi Bildirileri (ss. 519–529). Samsun, Türkiye.

Taner, A., Tekgüler, A., Sauk, H., & Demirel, B. (2015). Yapay sinir ağları ile makarnalık buğday çeşitlerinin sınıflandırılması. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 30(1), 51–59.

Tao, Y., & Wen, Z. (1999). An adaptive spherical image transform for high-speed fruit defect detection. *Transactions of the ASAE*, 42(1), 241–246.

Tarafdar, A., Shahi, N. C., Singh, A., & Sirohi, R. (2018). Artificial neural network modeling of water activity: A low-energy approach to freeze drying. *Food and Bioprocess Technology*, 11(1), 164–171.

Tektaş, M., Bozüyük, T., Yağcı, C., Gökçe, İ., & Akar, G. (2005). Yapay zekâ teknolojilerinin endüstrideki uygulamaları. Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu.

Tollner, E. W., Şahin, M. A., Maw, B. W., Gitaitis, R. D., & Summer, D. R. (1999). Classification of onions based on internal defects using image processing and neural network techniques. In ASAE Annual International Meeting (Paper No. 993165). American Society of Agricultural Engineers.

Torrecilla, J. S., Otero, L., & Sanz, P. D. (2005). Artificial neural networks: A promising tool to design and optimize high-pressure food processes. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 299–306.

Torres, M., Hervás, C., ve Amador, F. (2005). Approximating the sheep milk production curve through the use of artificial neural networks and genetic algorithms. *Computers & Operations Research*, 32(10), 2653–2670

Tripathy, P. P., & Kumar, S. (2009). Neural network approach for food temperature prediction during solar drying. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(7), 1452–1459.

Thrupathihalli, P. K. M., & Balaraman, M. (2012). Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb.): Prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 1229–1236.

Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236), 433–460.
<https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>

Uzunov, R., ve & Angeleska, A. (2026). Artificial intelligence (AI) in food safety and quality: New approach, advantages, and disadvantages. *Italian Journal of Food Science*, 38(2), 148–158. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v38i2.3525>

Wang, M. ve Li, X. (2024). Application of artificial intelligence techniques in meat processing: a review. *J. Food Process Eng.* 47:e14590. doi: 10.1111/jfpe.14590

Wang, Y. (2025). Application of Artificial Intelligence in Food Industry: A Review. *Agricultural Science and Food Processing*, 2(2), 68–88.
<https://doi.org/10.62762/ASFP.2025.552607>

Winiczenko, R., Kaleta, A., & Górnicki, K. (2021). Application of a MOGA Algorithm and ANN in the Optimization of Apple Drying and Rehydration Processes. *Processes*, 9(8), 1415.
<https://doi.org/10.3390/pr9081415>

Vasudevan S. Lamine Mekhalfi M. Blanes C. Lecca M. Poiesi F. Ian Chippendale P. ve ark. (2024). Machine vision and robotics for primary food manipulation and packaging: a survey.

IEEE Access 12, 152579–152613. Doi:
10.1109/ACCESS.2024.3479781

Velioğlu, H. M. (2010). Görüntü işleme teknolojisi ve yapay sinir ağlarının gıda ürünlerinde bazı kalite özelliklerinin belirlenmesinde kullanılması (Doktora tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Yang, Q. (1993). Classification of apple surface features using machine vision and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 9(1), 1–12.

Yang, D., Jiang, J., Jie, Y., Li, Q., & Shi, T. (2022). Detection of the moldy status of the stored maize kernels using hyperspectral imaging and deep learning algorithms. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 170–186.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2021.2022564>

Yang, T., Zheng, X., Vidyarthi, S. K., Xiao, H., Yao, X., Li, Y., Zang, Y., & Zhang, J. (2023). Artificial neural network modeling and genetic algorithm multiobjective optimization of process of drying-assisted walnut breaking. *Foods*, 12(9), 1897.
<https://doi.org/10.3390/foods12091897>

Yang, Hang & Jiao, Wenxuan & Zouyi, Lingyun & Diao, Hongli & Xia, Shibin. (2025). Artificial intelligence in the food industry: innovations and applications. *Discover Artificial Intelligence*. 5. Doi: 10.1007/s44163-025-00296-8.

Yin, Y. G., & Ding, Y. (2009). A close-to-real-time prediction method of total coliform bacteria in foods based on image identification technology and artificial neural network. *Food Research International*, 42(2), 191–199.

Yongnian, N., & Chao, L. (1999). Artificial neural networks and multivariate calibration for spectrophotometric differential

kinetic determinations of food antioxidants. *Analytica Chimica Acta*, 396(2–3), 221–230.

Yuvaraj, M. , Jothi Basu R., Abdulrahman M. D.-A., and Ganesh Kumar C.. 2023. “Implementation of Information and Communication Technologies in Fruit and Vegetable Supply Chain: A Systematic Literature Review.” *Industrial Management & Data Systems* 123, no. 9: 2349–2377. Doi: 10.1108/IMDS-01-2023-0058

Zadeh LA (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338–353.

Doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X

BÖLÜM 2

GIDA FERMENTASYONUNDA OMİK TEKNOLOJİLERİ: MİKROBİYOTA ANALİZLERİ METABOLOMİK YAKLAŞIMLAR VE MULTI- OMİK ENTEGRASYON

TUĞBA KARABEKMEZ ERDEM¹
YEKTA GEZGİNÇ²

Giriş

Mikrobiyal fermentasyon, gıdaların muhafazasında ve aroma-lezzet özelliklerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan önemli bir biyoteknolojik süreçtir. Birçok fermente gıdanın karakteristik tat ve aroma profili; mikrobiyal topluluklar, substratlar (başlıca karbonhidratlar, proteinler ve lipitler) ile çevresel koşullar arasındaki karmaşık etkileşimlerin sonucunda oluşmaktadır. Bu nedenle mikroorganizmalar, fermente gıdaların duyuusal özelliklerinin şekillenmesinde ve ürün kalitesinin belirlenmesinde temel bir role sahiptir (Chen, 2022; Wen ve ark., 2024).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-6361-4796

² Prof. Dr. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3230-2850

Geçmişte gıdaların fermentasyonu büyük ölçüde hammaddelerde doğal olarak bulunan mikroorganizmalar ile üretim ortamının çevresel ve coğrafi koşullarına bağlı olarak gerçekleşmekteydi. Ancak gıda güvenliğine yönelik farkındalığın artması ve endüstriyel ölçekte üretim süreçlerinin yaygınlaşması, fermentasyonun daha kontrollü ve standardize edilmiş koşullarda yürütülmesini gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda, starter kültürlerin ve fermentasyona yardımcı mikroorganizmaların kullanımı yaygınlaşmış, böylece ürün kalitesinin ve güvenliğinin sürdürülebilir şekilde sağlanması mümkün hale gelmiştir. Son yıllarda moleküler biyoloji alanında yaşanan gelişmeler, özellikle yeni nesil dizileme (Next Generation Sequencing, NGS) teknolojileri, çoklu omik (multi-omics) yaklaşımları, biyoinformatik araçlar ve ileri istatistiksel analiz yöntemleri sayesinde fermente gıdaların mikrobiyal ekolojisinin ayrıntılı olarak incelenmesine olanak sağlamıştır (Mannaa ve ark., 2021; Gezginc ve ark, 2022). Bu teknolojiler kullanılarak fermente gıdalarda bulunan mikrobiyal toplulukların bileşimi, fermentasyon sürecinde görev alan mikroorganizmaların genomik özellikleri ve bunların metabolik potansiyelleri kapsamlı bir şekilde ortaya konulabilmektedir. Elde edilen bilgiler, fermentasyon sürecinin işleyiş mekanizmalarının, mikrobiyal çeşitliliğin ve mikroorganizmalar tarafından yürütülen metabolik yolların daha iyi anlaşılmasını sağlamış; buna bağlı olarak fermentasyon endüstrisinde önemli bilimsel ve teknolojik ilerlemelerin önünü açmıştır (Mannaa ve ark., 2021).

Bu gelişmeler ışığında, geleneksel fermentasyon süreçlerinin altında yatan mikrobiyolojik ve biyokimyasal mekanizmalar daha ayrıntılı biçimde açıklanabilmekte ve fermentasyonun kalite, güvenlik ve fonksiyonellik açısından daha etkin bir şekilde yönetilmesi mümkün olmaktadır.

Bu kapsamda genomik, transkriptomik, proteomik ve metabolomik gibi omik teknolojileri, fermentasyon sırasında

meydana gelen karmaşık mikrobiyal etkileşimlerin ve metabolik dönüşümlerin bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Omik yaklaşımları arasında özellikle mikrobiyota analizleri ve metabolomik çalışmalar, fermente gıdaların karakterizasyonu ve fermentasyon süreçlerinin optimizasyonunda  ne çıkmaktadır (Walsh ve ark., 2023). Mikrobiyota analizleri, fermentasyon boyunca mikrobiyal toplulukların yapısını, çeşitliliğini ve zamana bağlı değişimlerini ortaya koyarken; metabolomik analizler, bu mikroorganizmalar tarafından üretilen veya tüketilen metabolitlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Böylece fermentasyon sürecinde görev alan mikroorganizmalar ile oluşan metabolik ürünler arasındaki ilişkiler açıklanabilmekte, ürün kalitesi, aroma gelişimi, fonksiyonel özellikler ve gıda güvenliği açısından kritik öneme sahip biyolojik süreçler daha ayrıntılı şekilde anlaşılabilmektedir (Wen ve ark., 2024). Bu nedenle mikrobiyota analizleri ve metabolomik yaklaşımlar, günümüzde fermente gıdaların mikrobiyal ekolojisinin ve metabolik dinamiklerinin aydınlatılmasında kullanılan en güçlü araçlar arasında yer almakta ve modern fermentasyon araştırmalarının temel bileşenlerini oluştırmaktadır.

Mikrobiyota Kavramı

Mikrobiyota, belirli bir ortamda bulunan bakteri, maya, küf gibi mikroorganizmalardan oluşan karmaşık topluluğu ifade etmektedir. Bu mikrobiyal topluluklar, kullanılan hammadde, üretim yöntemi, çevresel koşullar ve fermentasyon süresine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Louw ve ark., 2023; Valentino ve ark., 2024).

Fermente gıdalarda bulunan laktik asit bakterileri (Lactobacillus, Leuconostoc, Enterococcus, Streptococcus, Oenococcus ve Pediococcus), asetik asit bakterileri (Acetobacter, Gluconobacter, Asaia) ve mayalar (Debaryomyces, Kluyveromyces,

Saccharomyces, Aspergillus, Mucor, Penicillium, ve Rhizopus) cinsleri gibi mikroorganizmalar enerji üretimi ve çevreye adaptasyon süreçlerinin bir parçası olarak gıdanın yapısını değiştiren çeşitli bileşikler üretmektedirler. Karbonhidratlar, proteinler ve lipitler gibi gıda bileşenlerinin metabolize edilmesi ile üretilen bu bileşenler; organik asitler, alkoller, esterler, peptitler ve diğer biyoaktif bileşiklerdir. Söz konusu metabolitler sayesinde ürünün aroma, lezzet, tekstür ve raf ömrü gibi kalite özellikleri şekillenmektedir. Aynı zamanda fermentasyon sırasında oluşan mikrobiyal etkileşimler, ürün güvenliği ve fonksiyonel özelliklerin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır (Leeuwendaal ve ark., 2022; Mukherjee ve ark., 2024).

Geleneksel olarak fermente gıdalardaki mikrobiyal topluluklar kültüre dayalı yöntemlerle incelenirken, yeni nesil dizileme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte mikrobiyota kavramı daha kapsamlı bir boyut kazanmıştır. Günümüzde mikrobiyota yalnızca ortamda bulunan mikroorganizmaların listesi olarak değil, aynı zamanda bu organizmalar arasındaki ekolojik ilişkileri, fonksiyonel kapasiteleri ve fermentasyon sürecindeki dinamik değişimleri de kapsayan bir ekosistem olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, fermentasyonun altında yatan biyolojik mekanizmaların anlaşılmasını kolaylaştırmakta ve ürün kalitesinin iyileştirilmesine yönelik yeni stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Louw ve ark., 2023; Walsh ve ark., 2023).

Fermente gıdaların mikrobiyotası, karmaşık mikrobiyal etkileşimlerin gerçekleştiği doğal model sistemler olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle mikrobiyota analizleri, fermentasyon süreçlerinin kontrolü, starter kültür geliştirilmesi, ürün standardizasyonu ve gıda güvenliğinin sağlanması açısından modern gıda biyoteknolojisinin temel araştırma alanlarından biri haline gelmiştir.

Fermente Gıdalarda Mikrobiyota Analizleri

Fermente gıdalarda mikrobiyota analizleri, mikrobiyal toplulukların bileşimini, çeşitliliğini ve fonksiyonel özelliklerini ortaya koymayı amaçlayan önemli moleküler yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Özellikle son yirmi yılda metagenomik ve diğer yüksek kapasiteli moleküler profillemeye tekniklerinde yaşanan gelişmeler, gıda mikrobiyolojisi alanındaki bilgi birikimini önemli ölçüde genişletmiştir. Bu yöntemler sayesinde, fermente gıdalarda yer alan mikroorganizmaların taksonomik yapısı, ekolojik ilişkileri ve fermentasyon sürecindeki biyolojik işlevleri ayrıntılı olarak incelenebilmekte; böylece fermentasyonun altında yatan karmaşık mikrobiyal ve fonksiyonel mekanizmalar daha kapsamlı bir şekilde anlaşılabilir (Walsh ve ark., 2023; Wen ve ark., 2024).

Yüksek verimli dizileme (High-Throughput Sequencing, HTS) teknolojileri, kültüre bağımlı yöntemlerin sınırlamalarını aşarak mikrobiyal toplulukların kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesine olanak sağlamaktadır. Fermente gıdaların mikrobiyotasının incelenmesinde başlıca ampikon dizileme, tüm metagenom shotgun dizileme (Whole Metagenome Shotgun Sequencing, WMS) ve metatranskriptomik analizler kullanılmaktadır (De Filippis ve ark., 2017; Srinivas ve ark., 2022; Yap ve ark., 2022).

Ampikon dizileme, mikrobiyal toplulukların taksonomik yapısını belirlemek amacıyla en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yaklaşım, bakterilerde 16S rRNA, funguslarda ise ITS (Internal Transcribed Spacer) veya 18S rRNA gibi belirteç bölgelerin dizilenmesine dayanır (Cao ve ark., 2017).

16S rRNA gen dizilemesi, bakteriyel toplulukların tanımlanması ve karakterizasyonu amacıyla en yaygın kullanılan kültürden bağımsız moleküler yöntemlerden biridir. Bu yöntem, prokaryotlarda bulunan ve yaklaşık 1.500 baz çifti uzunluğundaki

16S rRNA geninin korunmuş ve değişken bölgelerinin analizine dayanmaktadır. Genin korunmuş bölgeleri evrensel primerlerin tasarlanmasına olanak sağlarken, değişken bölgeler (V1–V9) farklı mikroorganizma gruplarının taksonomik olarak ayırt edilmesini mümkün kılmaktadır (Janda ve Abbott, 2007; Johnson ve ark., 2019). 16S rRNA dizilemesinin en önemli avantajları arasında yüksek duyarlılık, kültüre edilemeyen mikroorganizmaların tespit edilebilmesi, nispeten düşük maliyet ve büyük örnek gruplarının analizine uygun olması yer almaktadır. Bununla birlikte, yöntem bazı sınırlılıklara da sahiptir. Özellikle tür ve suş düzeyinde ayırım yapma kapasitesi sınırlı olabilmekte, ayrıca mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri veya fonksiyonel özellikleri hakkında doğrudan bilgi sağlayamamaktadır (Johnson ve ark., 2019; Walsh ve ark., 2023). Fermente gıda araştırmalarında 16S rRNA gen dizilemesi, mikrobiyal ekolojinin anlaşılması, ürün kalitesinin izlenmesi, starter kültürlerin değerlendirilmesi ve fermentasyon süreçlerinin optimizasyonu açısından temel bir araç olarak kabul edilmektedir. Özellikle yeni nesil dizileme platformlarının gelişmesiyle birlikte bu yöntem, fermente gıdaların mikrobiyomunun yüksek çözünürlükte analiz edilmesine olanak sağlayarak modern gıda mikrobiyolojisinin vazgeçilmez tekniklerinden biri haline gelmiştir (Walsh ve ark., 2023; Valentino ve ark., 2024).

ITS dizilemesi, maya ve küf topluluklarının karakterizasyonunda en yaygın kullanılan moleküler yöntemlerden biridir. ITS bölgesi, rRNA gen kümesi içerisinde yer alan ve 18S, 5.8S ve 28S rRNA genleri arasında bulunan yüksek derecede değişken DNA bölgelerinden oluşmaktadır. Bu değişkenlik, fungusların tür düzeyinde ayırt edilmesini mümkün kıldığından ITS bölgesi, funguslar için evrensel DNA barkodu olarak kabul edilmektedir (Nilsson ve ark., 2019). ITS dizilemesi sayesinde fermentasyon sürecinde yer alan fungal toplulukların bileşimi,

çeşitliliği ve zamana bağlı değişimleri ayrıntılı olarak belirlenebilmektedir. Özellikle peynir, kefir, kombucha, soya bazlı fermente ürünler, şarap, bira ve geleneksel Asya fermente gıdalarında maya ve küf ekolojisinin aydınlatılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bokulich & Mills, 2012; Chen ve ark., 2017). Yüksek verimli dizileme platformları ile birleştirilen ITS amplikon dizilemesi, kültüre edilemeyen veya ortamda az bulunan fungal türlerin tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece fermentasyon sırasında baskın hale gelen maya ve küf türleri belirlenebilmekte, ürün kalitesi ve duyuşsal özelliklerle ilişkili mikrobiyal dinamikler ortaya konulabilmektedir. Bununla birlikte, ITS dizilemesinin veri tabanlarındaki eksiklikler, primer seçimine bağlı yanlılıklar ve bazı yakın türlerin ayrımındaki zorluklar gibi sınırlılıkları bulunmaktadır. Ayrıca bakteriyel 16S rRNA analizlerinde olduğu gibi, ITS dizilemesi de mikroorganizmaların fonksiyonel aktiviteleri hakkında doğrudan bilgi sağlamamaktadır (Ru   ve ark., 2023; Nilsson ve ark., 2019). Bu nedenle g  n  m  zde 16S rRNA ve ITS dizileme verileri, metagenomik, metatranskriptomik ve metabolomik analizlerle birlikte değerlendirilerek hem bakteriyel hem de fungal toplulukların fermentasyon s  recindeki fonksiyonel rollerinin daha kapsamlı bi  imde anlaşılmaları hedeflenmektedir.

T  m metagenom shotgun dizileme ise   evresel   rneklerden elde edilen toplam DNA'nın rastgele dizilenmesine dayanmaktadır. Bu y  ntem, bir yandan fermente gıdaların mikrobiyal topluluğunun taksonomik kompozisyonu belirlerken diğer yandan sahip olduğu genetik repertuarı ve fonksiyonel potansiyeli de ortaya koyabilmektedir. WMS yaklaşımları sayesinde mikroorganizmalar t  r ve suşı d  zeyinde tanımlanabilmekte, ayrıca ortamda az sayıda bulunan veya laboratuvar koşıullarında k  lt  re edilemeyen mikroorganizmalar da belirlenebilmektedir. (Walsh ve ark., 2023; Sadurski ve ark., 2024). Amplikon temelli yaklaşımlardan farklı

olarak WMS yönteminde, yalnızca belirli belirteç genlerin (örneğin 16S rRNA veya ITS) analiz edilmesi yerine örnekte bulunan tüm genetik materyalin incelenmesine olanak sağlanmaktadır (De Filippis ve ark., 2017). WMS yöntemi ayrıca antibiyotik direnç genleri, virölans faktörleri, bakteriyofajlar ve mobil genetik elementler gibi fermentasyonun güvenliği ve stabilitesi açısından önemli unsurları da belirleyebilmektedir. Dolayısıyla gıda güvenliği çalışmaları, kontaminasyon kaynaklarının belirlenmesinde ve fermentasyon başarısızlıklarının nedenlerinin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sadurski ve ark., 2024).

Metatranskriptomik (RNA-Seq) analizleri ise mikrobiyal toplulukların belirli bir andaki fonksiyonel aktivitelerinin incelenmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, hangi genlerin aktif olarak ifade edildiğini ve gen ekspresyonunun düzeyini ortaya koyarak fermentasyon sürecinde gerçekleşen biyolojik olayların dinamik bir görünümünü sunmaktadır. Böylece metagenomik analizlerle belirlenen genetik potansiyelin hangi koşullarda ve ne ölçüde kullanıldığı anlaşılabilir (Chen ve ark., 2017; Song ve ark., 2017; Butowski ve ark., 2025).

Dizileme verilerinin elde edilmesinin ardından, mikroorganizmaların taksonomik dağılımını, gen içeriklerini ve fonksiyonel özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli biyoinformatik analizler uygulanmaktadır. Bu analizler sayesinde fermentasyon ekosistemlerinde yer alan mikrobiyal toplulukların yapısı, işlevleri ve metabolik potansiyelleri kapsamlı bir şekilde ortaya konulabilmekte; böylece fermentasyon süreçlerinin daha iyi anlaşılması ve kontrol edilmesi mümkün olmaktadır (Chelliah ve ark., 2022).

Metagenomik analizler "orada kimin olduğu" ve "ne yapabilecekleri" hakkında bilgi verse de, mikroorganizmaların anlık faaliyetlerini tam olarak yansıtmada yetersiz kalabilir. Bu nedenle, fermentasyon mekanizmalarını bütünüyle kavramak için

mikrobiyota verilerinin; metatranskriptomik, metaproteomik ve metabolomik verilerle entegre edildiği multi-omik yaklaşımların kullanılması modern araştırmalarda temel strateji haline gelmiştir (Silva ve ark., 2026). Nitekim fermentasyon süreçlerinde multi-omik yaklaşımlar, biyokimyasal yolların detaylı olarak haritalandırılmasına da olanak sağlamaktadır. Metagenomik analizler mikrobiyal toplulukların bileşimini ve genetik potansiyelini ortaya koyarken, transkriptomik çalışmalar bu genlerin farklı fermentasyon aşamalarında nasıl ifade edildiğini göstermektedir. Proteomik analizler aktif proteinleri belirlerken, metabolomik veriler ise bu biyolojik faaliyetlerin sonucunda oluşan metabolitleri ortaya koymaktadır. Böylece laktik asit, etanol, organik asitler, esterler ve diğer aroma bileşiklerinin sentezinden sorumlu metabolik yollar ayrıntılı olarak tanımlanabilmektedir. (Subramanian ve ark., 2020; Wen ve ark., 2024).

Fermente Gıdalarda Metabolomik Yaklaşımlar

Metabolomik, bir biyolojik sistemde belirli bir zamanda bulunan düşük molekül ağırlıklı tüm metabolitlerin nitel ve nicel olarak incelenmesini amaçlayan omik teknolojilerinden biridir. Metabolitler; amino asitler, organik asitler, şekerler, yağ asitleri, alkoller, esterler ve diğer biyolojik olarak aktif küçük molekülleri kapsamakta olup, hücrel metabolizmanın son ürünleri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle metabolomik analizler, bir organizmanın veya mikrobiyal topluluğun fizyolojik durumu ile çevresel koşullara verdiği yanıtların doğrudan değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Johnson & Gonzalez, 2012; Cevallos-Cevallos ve ark., 2009).

Fermente gıdalar açısından metabolomik, fermentasyon sürecinde meydana gelen biyokimyasal dönüşümlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayan önemli bir araştırma alanıdır. Fermentasyon sırasında mikroorganizmalar tarafından

gerçekleştirilen metabolik faaliyetler sonucunda çok sayıda metabolit oluşmakta veya dönüşüme uğramaktadır. Bu metabolitler, ürünün aroma, lezzet, tekstür, besin değeri, raf ömrü ve fonksiyonel özelliklerinin şekillenmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Dolayısıyla metabolomik, fermentasyon ekosistemlerinde gerçekleşen biyolojik süreçleri açıklamak ve mikroorganizmaların fonksiyonel rollerini ortaya koymak için güçlü bir araç olarak değerlendirilmektedir (Gao ve ark., 2021; Wen ve ark., 2024).

Metabolomik çalışmalar genel olarak iki temel yaklaşımla yürütülmektedir. Hedefli (targeted) metabolomik, önceden belirlenmiş metabolitlerin veya metabolit gruplarının hassas ve kantitatif olarak analiz edilmesine odaklanmaktadır. Bu yaklaşım özellikle belirli biyobelirteçlerin doğrulanması veya spesifik metabolik yolların araştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Buna karşılık hedefsiz (untargeted) metabolomik, örnekte bulunan mümkün olduğunca fazla metabolitin aynı anda analiz edilmesini amaçlamakta ve metabolik profilin bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Hedefsiz yaklaşımlar, yeni biyobelirteçlerin keşfi ve fermentasyon sırasında meydana gelen beklenmedik metabolik değişimlerin ortaya çıkarılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Pinu ve ark., 2019).

Fermente gıdalarda metabolomik uygulamaları, fermentasyonun farklı aşamalarında gerçekleşen biyokimyasal değişimlerin ve metabolik yolların aydınlatılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede aroma ve lezzet oluşumundan sorumlu metabolitlerin belirlenmesi, besin öğelerinin biyoyararlanımının artırılması, antinütrisyonel bileşiklerin azaltılması ve fonksiyonel bileşenlerin üretiminin optimize edilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca metabolomik analizler, ürünlerin orijinalliğinin doğrulanması, kalite kontrolünün sağlanması, toksin veya diğer istenmeyen bileşiklerin tespit edilmesi ve yeni starter

kültürlerin geliştirilmesi gibi alanlarda da önemli katkılar sunmaktadır (Wishart, 2019; Gao ve ark., 2021).

Metabolomik araştırmalarda en yaygın kullanılan analitik yöntemler kütle spektrometrisi (MS) ve nükleer manyetik rezonans (NMR) teknolojileridir. MS, yüksek duyarlılığı ve çok sayıda metabolitin aynı anda analiz edilebilmesine olanak sağlaması nedeniyle metabolomik çalışmaların temel araçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS) ve Sıvı Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi (LC-MS), metabolomik araştırmalarda en yaygın kullanılan analitik yöntemler arasında yer almaktadır. Bu teknikler, kromatografik ayırma sistemlerinin yüksek çözünürlüğünü kütle spektrometrisinin yüksek duyarlılık ve seçiciliği ile birleştirerek karmaşık biyolojik örneklerde çok sayıda metabolitin eş zamanlı olarak belirlenmesine olanak sağlamaktadır. GC-MS özellikle uçucu ve yarı uçucu bileşiklerin, kısa zincirli yağ asitlerinin, aroma bileşiklerinin ve bazı lipidlerin analizinde tercih edilirken; LC-MS amino asitler, peptitler, fenolik bileşikler, organik asitler ve diğer yarı polar veya polar metabolitlerin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek metabolit kapsama alanı sayesinde LC-MS tabanlı çalışmalarda yüzlerce metabolit tespit edilebilirken, GC-MS daha çok uçucu metabolitlerin ayrıntılı karakterizasyonunda öne çıkmaktadır (Dettmer ve ark., 2007; Pinu ve ark., 2019; Gao ve ark., 2021). NMR ise minimum örnek hazırlama gereksinimi, yüksek tekrarlanabilirliği ve moleküler yapı hakkında ayrıntılı bilgi sunması nedeniyle metabolomik çalışmalar için önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Pinu ve ark., 2019; Wishart, 2019; Zeki ve ark., 2020). Bununla birlikte NMR yöntemi, kütle spektrometrisi temelli yöntemlere kıyasla daha düşük duyarlılık ve çözünürlüğe sahip olması, özellikle düşük konsantrasyonlarda bulunan metabolitlerin tespitini sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle karmaşık biyolojik örneklerde tanımlanabilen metabolit sayısı genellikle sınırlı kalmakta ve

çoğunlukla yüksek miktarda bulunan metabolitler analiz edilebilmektedir (Emwas ve ark., 2019; Wishart, 2019; Gao ve ark., 2021).

Fermentasyon Sürecinde Metabolomik ve Mikrobiyota Verilerinin Entegrasyonu

Tek başına mikrobiyota (metagenomik) veya metabolomik analizler, fermentasyon sistemlerinin karmaşık yapısını tam olarak açıklamakta yetersiz kalabilmektedir. Mikrobiyota analizleri fermentasyon ortamında bulunan mikroorganizmaların kimlikleri, çeşitlilikleri ve fonksiyonel potansiyelleri hakkında bilgi sağlarken, metabolomik analizler bu mikroorganizmaların faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan metabolitleri ve metabolik çıktıları ortaya koymaktadır. Ancak bu iki yaklaşımın ayrı ayrı değerlendirilmesi, mikroorganizmalar ile ürettikleri metabolitler arasındaki neden-sonuç ilişkilerinin açıklanmasında yeterli olmamaktadır. Bu nedenle son yıllarda fermentasyon araştırmalarında farklı omik katmanların birlikte değerlendirildiği multi-omik entegrasyon yaklaşımları ön plana çıkmıştır (Picard ve ark., 2021).

Multi-omik entegrasyon; genomik, metagenomik, transkriptomik, proteomik ve metabolomik verilerin bir araya getirilerek biyolojik sistemlerin bütüncül olarak incelenmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım sayesinde fermentasyon sürecinde görev alan mikroorganizmalar ile bunların ürettiği biyoaktif bileşikler arasındaki ilişkiler tek bir model altında değerlendirilebilmekte, biyolojik bilginin genlerden metabolitlere kadar uzanan akışı ayrıntılı olarak izlenebilmektedir. Böylece belirli mikroorganizmaların hangi metabolik yollar aracılığıyla belirli ürünleri oluşturduğu açıklanabilmekte ve fermentasyonun altında yatan mekanizmalar daha kapsamlı şekilde anlaşılabilir (Subramanian ve ark., 2020).

Multi-omik entegrasyonun bir diğ er önemli avantajı, fermentasyon süreçlerinin zamansal ve dinamik olarak izlenebilmesidir. Farklı zaman noktalarında elde edilen mikrobiyota ve metabolit verileri kullanılarak mikrobiyal toplulukların değişimi, çevresel faktörlere verdikleri yanıtlar ve metabolit üretimindeki dalgalanmalar değerlendirilebilmektedir. Bu sayede fermentasyonun farklı aşamalarında kritik rol oynayan mikroorganizmalar ve metabolik süreçler belirlenebilmekte, ürün kalitesini etkileyen temel faktörler ortaya konabilmektedir. Günümüzde makine öğrenmesi, yapay sinir ağları ve diğ er gelişmiş biyoinformatik yöntemler kullanılarak çok boyutlu omik veriler analiz edilmekte ve fermentasyon süreçlerini yönlendiren temel biyolojik belirleyiciler daha yüksek doğrulukla tanımlanabilmektedir (Tablo 1) (Zhang ve ark., 2025).

Tablo 1 Fermentasyon Sürecinde Mikrobiyota ve Metabolomik Verilerinin Entegrasyonunda Kullanılan Multi-Omik Stratejiler, Hesaplamalı Yaklaşımlar ve Uygulama Alanları

Yöntem Kategorisi	Entegrasyon Stratejisi	Kullanılan Algoritmalar ve Araçlar	Analiz Amacı	Veri Türleri	Kaynak
Multi-omiks Entegrasyonu	Ağ tabanlı (Network-based)	OmicsNet, PaintOmics, mixOmics, Makine Öğrenmesi (ML)	Moleküler etkileşimlerin ve biyobelirteçlerin belirlenmesi, lezzet mekanizmaları	Genomik, Transkriptomik, Proteomik, Metabolomik	Zhou ve ark., (2018); García-Alcalde ve ark., (2011); Rohart ve ark., (2017);
Dijital İkiz (Digital Twin)	Hiyerarşik / Hibrit Modelleme	Karar Ağaçları, Yapay Sinir Ağları (ANN), Dinamik Bayes Ağları, Genelleştirilmiş Lotka-Volterra (glv)	Gerçek zamanlı izleme, mikrobiyal dinamik tahmini, proses optimizasyonu	Zaman serisi mikrobiyota verileri, Metabolomik, Fizikokimyasal parametreler	Stein ve ark., (2013); Bucci ve ark., (2016); Li ve ark., (2021); Sizemore ve ark., (2024); Zhang ve ark., (2025)
Uygulamalı Analiz	Mikrobiyal Mekanizma Çözümleme	Random Forest (RF), Destek Vektör Makineleri (SVM), Pearson Korelasyonu, KEGG Fonksiyonel Tahmini	Lezzet (aroma) oluşum mekanizmalarının tespiti, GABA içeriğinin tahmini	Metagenomik, Metatranskriptomik, Metabolomik	Lee ve ark., (2017); Bao ve ark., (2020); Jia ve ark., (2021); Kharnaier& Tamang, 2021; Qi ve ark., (2022); Ling ve ark., (2022); Liu ve ark., (2023); Jiang ve ark., (2026)

Optimizasyon	Endüstriyel Üretim Optimizasyonu	Yapay Zeka (AI) Çerçeveleri	Üretim tutarlılığı, güvenlik testi ve süreç stabilizasyonu	Metabolomik, Çevresel faktör verileri	Xie ve ark., (2019); Jia ve ark., (2020); Qi ve ark., (2022); Yao ve ark., (2022)
Veri Entegrasyon Stratejileri	Karma (Mixed) Entegrasyon	Kernel tabanlı yöntem, Graf tabanlı yöntemler (multi-omics, SNF, ANF), mixOmics	Sinyal yollarının belirlenmesi ve etkileşim ağlarının analizi	Transkriptomik, Proteomik, Metabolomik	Gönen&Alpaydın, (2011); Wang ve ark., (2014); Ma &Zhang (2017); Valdeolivas ve ark., (2019); Shang& Liu ve ark., (2020); Picard ve ark., (2021)

Fermentasyon araştırmalarında multi-omik entegrasyonun dikkat çekici uygulamalarından biri Lactobacillomics yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, laktik asit bakterilerinin genomik, transkriptomik, proteomik ve metabolomik özelliklerini birlikte değerlendirerek bakterilerin fermentasyon ekosistemlerindeki fonksiyonlarını kapsamlı şekilde açıklamayı amaçlamaktadır. Lactobacillomics sayesinde laktik asit bakterilerinin metabolik kapasiteleri, çevresel koşullara adaptasyon mekanizmaları, protein ekspresyon profilleri ve metabolik çıktıları bütüncül olarak incelenebilmekte; böylece fermentasyon sürecindeki rolleri daha ayrıntılı biçimde ortaya konulabilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle organik asitler, aroma bileşikleri, ekzopolisakkaritler ve diğer biyoaktif metabolitlerin oluşum mekanizmalarının anlaşılmasında önemli katkılar sağlamaktadır (Kahraman-Ilıkkın, 2025).

Farklı omik katmanlardan elde edilen verilerin entegrasyonu çeşitli istatistiksel ve hesaplamalı yöntemlerle gerçekteştirilmektedir. Korelasyon analizleri sayesinde belirli mikroorganizma türleri ile metabolitler arasındaki ilişkiler belirlenebilmekte, hiyerarşik entegrasyon modelleri biyolojik sistemlerin doğal organizasyonunu yansıtarak gen ekspresyonu ile metabolik çıktıları arasındaki bağlantıları açıklayabilmektedir (Jiang ve ark., 2026).

Sonuç olarak, metabolomik ve mikrobiyota verilerinin entegrasyonu fermentasyon sistemlerinin yalnızca yapısal değil, aynı zamanda fonksiyonel açıdan da anlaşılmasını sağlayan güçlü bir araştırma stratejisidir. Bu yaklaşım sayesinde mikroorganizmalar ile metabolik çıktıları arasındaki ilişkiler ayrıntılı olarak ortaya konulabilmekte, fermentasyon süreçleri daha etkin şekilde kontrol edilebilmekte ve ürün kalitesi hedefe yönelik olarak optimize edilebilmektedir. Ayrıca elde edilen bilgiler, yeni starter kültürlerin geliştirilmesi, fermentasyon verimliliğinin artırılması ve daha

güvenli, fonksiyonel fermente gıdaların üretilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır (Liu ve ark., 2025).

Sonuç

Mikrobiyota analizleri ve metabolomik yaklaşımlar, fermente gıdalarda yer alan mikrobiyal toplulukların yapısının, çeşitliliğinin ve fonksiyonel potansiyelinin anlaşılmasında temel araçlar haline gelmiştir. Bu teknolojiler sayesinde fermentasyon süreçlerinde görev alan mikroorganizmalar, aroma ve lezzet oluşumunda rol oynayan metabolik yollar, ürün kalitesini belirleyen biyolojik mekanizmalar ve gıda güvenliği açısından önem taşıyan kontaminantlar, patojenler ile antibiyotik direnç genleri ayrıntılı olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca mikrobiyal toplulukların dinamiklerinin ortaya konulması, uygun starter kültürlerin seçilmesine, fermentasyon süreçlerinin optimize edilmesine ve ürün standardizasyonunun sağlanmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte, metagenomik analizler mikroorganizmaların genetik potansiyellerini ortaya koymakla sınırlı olduğundan, fermentasyon sırasında gerçekleşen anlık biyolojik faaliyetlerin ve mikrobiyal etkileşimlerin tam olarak anlaşılabilmesi için metatranskriptomik, metaproteomik ve metabolomik verilerle desteklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle günümüzde multi-omik yaklaşımlar, fermentasyon ekosistemlerinin bütüncül olarak değerlendirilmesinde en etkili strateji olarak kabul edilmektedir. Söz konusu gelişmeler, yalnızca fermentasyon mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda daha güvenli, kaliteli ve fonksiyonel fermente gıdaların geliştirilmesine olanak tanıyarak modern gıda biyoteknolojisinin ilerlemesine önemli katkılar sağlamaktadır.

Metabolomik ve mikrobiyota analizleri, fermente gıdaların mikrobiyal ekolojisinin ve metabolik dinamiklerinin anlaşılmasında temel araçlar haline gelmiştir. Yeni nesil dizileme teknolojileri, kütle

spektrometrisi tabanlı metabolomik yaklaşımlar ve biyoinformatik analizlerin entegrasyonu sayesinde fermentasyon süreçleri daha ayrıntılı olarak karakterize edilebilmekte, ürün kalitesi ve güvenliği artırılabilir. Gelecekte multi-omics yaklaşımların yaygınlaşmasıyla birlikte fermentasyon süreçlerinin daha etkin yönetilmesi ve yeni nesil fonksiyonel fermente ürünlerin geliştirilmesi mümkün olacaktır.

Kaynakça

Bao, W., X. Huang, J. Liu, B. Han, and J. Chen. 2020. Influence of *Lactobacillus brevis* on metabolite changes in bacteria-fermented sufu. *Journal of Food Science* 85 (1):165–72. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14968>.

Bokulich, N. A., & Mills, D. A. (2012). Next-generation approaches to the microbial ecology of food fermentations. *BMB Reports*, 45(7),377–389. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000431236>

Bucci, V., Tzen, B., Li, N., Simmons, M., Tanoue, T., Bogart, E., Deng, L., Yeliseyev, V., Delaney, M. L., Liu, Q., Stein, R. R., Honda, K., Bry, L., & Gerber, G. K. (2016). MDSINE: Microbial Dynamical Systems INference Engine for microbiome time-series analyses. *Genome biology*, 17(1), 121. <https://doi.org/10.1186/s13059-016-0980-6>

Butowski, C. F., Dixit, Y., Reis, M. M., & Mu, C. (2025). Metatranscriptomics for Understanding the Microbiome in Food and Nutrition Science. *Metabolites*, 15(3), 185. <https://doi.org/10.3390/metabo15030185>

Cao, Y., Fanning, S., Proos, S., Jordan, K., & Srikumar, S. (2017). A Review on the Applications of Next Generation Sequencing Technologies as Applied to Food-Related Microbiome Studies. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1829. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01829>

Chelliah, R., Banan-MwineDaliri, E., Khan, I., Wei, S., Elahi, F., Yeon, S. J., Selvakumer, Ofosu, F. K., Rubab, M., Ju, H. H., Rallabandi, H. R., Madar, I. H., Sultan, G., & Oh, D. H. (2022). A review on the application of bioinformatics tools in food microbiome studies. *Briefings in Bioinformatics*, 23(2), <https://doi.org/10.1093/bib/bbac007>

Chen, G., Chen, C., & Lei, Z. (2017). Meta-omics insights in the microbial community profiling and functional characterization of fermented foods. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.009>

Chen, W. (2022). Demystification of fermented foods by omics technologies. *Current Opinion in Food Science*, 46, 100845. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100845>

Cevallos-Cevallos, J. M., Reyes-De-Corcuera, J. I., Etxeberria, E., Danyluk, M. D., & Rodrick, G. E. (2009). Metabolomic analysis in food science: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(11–12), 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.07.002>

De Filippis, F., Parente, E., & Ercolini, D. (2017). Metagenomics insights into food fermentations. *Microbial Biotechnology*, 10(1), 91–102. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12421>

Dettmer, K., Aronov, P. A., & Hammock, B. D. (2007). Mass spectrometry-based metabolomics. *Mass Spectrometry Reviews*, 26(1), 51–78. <https://doi.org/10.1002/mas.20108>

Emwas, A. H. M., Roy, R., McKay, R. T., Tenori, L., Saccenti, E., Gowda, G. A. N., Raftery, D., Alahmari, F., Jaremko, L., Jaremko, M., & Wishart, D. S. (2019). NMR Spectroscopy for Metabolomics Research. *Metabolites*, 9(7), 123. <https://doi.org/10.3390/metabo9070123>

Gao, Y., Hou, L., Gao, J., Li, D., Tian, Z., Fan, B., Wang, F., & Li, S. (2021). Metabolomics Approaches for the Comprehensive Evaluation of Fermented Foods: A Review. *Foods*, 10(10), 2294. <https://doi.org/10.3390/foods10102294>

García-Alcalde, F., García-López, F., Dopazo, J., & Conesa, A. (2011). Paintomics: a web based tool for the joint visualization of

transcriptomics and metabolomics data. *Bioinformatics*, 27(1), 137-139. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq594>

Gezginc, Y., Karabekmez-Erdem, T., Tatar, H. D., Dağgeçen, E. C., Ayman, S., & Akyol, İ. (2022). Metagenomics and volatile profile of Turkish artisanal Tulum cheese microbiota. *Food Bioscience*, 45, 101497. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101497>

Gönen, M., & Alpaydın, E. (2011). Multiple kernel learning algorithms. *The Journal of Machine Learning Research*, 12, 2211-2268.

Kahraman Ilikkan, Ö. (2025). Lactobacillomics as a new notion in lactic acid bacteria research through omics integration. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 41(2), 68. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04285-y>

Leeuwendaal, N. K., Stanton, C., O'Toole, P. W., & Beresford, T. P. (2022). Fermented Foods, Health and the Gut Microbiome. *Nutrients*, 14(7), 1527. <https://doi.org/10.3390/nu14071527>

Louw, N. L., Lele, K., Ye, R., Edwards, C. B., & Wolfe, B. E. (2023). Microbiome Assembly in Fermented Foods. *Annual Review of Microbiology*, 77, 421–441. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-032521-041956>

Janda, J. M., & Abbott, S. L. (2007). 16S rRNA Gene Sequencing for Bacterial Identification in the Diagnostic Laboratory: Pluses, Perils, and Pitfalls. *Journal of Clinical Microbiology*, 45(9), 2761–2764. <https://doi.org/10.1128/JCM.01228-07>

Jia, Y., C. T. Niu, Z. M. Lu, X. J. Zhang, L. J. Chai, J. S. Shi, Z. H. Xu, and Q. Li. 2020. A bottom-up approach to develop a synthetic microbial community model: Application for efficient

reduced-salt broad bean paste fermentation. *Applied and Environmental Microbiology* 86 (12):e00306-20.
<https://doi.org/10.1128/AEM.00306-20>

Jia, Y., C. T. Niu, F. Y. Zheng, C. F. Liu, J. J. Wang, Z. M. Lu, Z. H. Xu, and Q. Li. 2021. Development of a defined autochthonous starter through dissecting the seasonal microbiome of broad bean paste. *Food Chemistry* 357:129625.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129625>.

Jiang, L., Lu, Y., & He, Q. (2026). Unlocking the microbial mechanisms in fermented bean products: Advances and future directions in multi-omics and machine learning approaches. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 66(7), 1364-1386.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2544764>

Johnson, C. H., & Gonzalez, F. J. (2012). Challenges and opportunities of metabolomics. *Journal of Cellular Physiology*, 227(8), 2975–2981. <https://doi.org/10.1002/jcp.24002>

Johnson, J. S., Spakowicz, D. J., Hong, B. Y., Petersen, L. M., Demkowicz, P., Chen, L., Leopold, S. R., Hanson, B. M., Agresta, H. O., Gerstein, M., & others (2019). Evaluation of 16S rRNA Gene Sequencing for Species and Strain-Level Microbiome Analysis. *Nature Communications*, 10, 5029.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13036-1>

Kharnaier, P., and J. P. Tamang. 2021. Bacterial and fungal communities and their predictive functional profiles in kinema, a naturally fermented soybean food of India, Nepal and Bhutan. *Food Research International* (Ottawa, Ont.) 140:110055.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110055>.

Lee, S., S. Lee, D. Singh, J. Y. Oh, E. J. Jeon, H. S. Ryu, D. W. Lee, B. S. Kim, and C. H. Lee. 2017. Comparative evaluation of microbial diversity and metabolite profiles in doenjang, a fermented

soybean paste, during the two different industrial manufacturing processes. *Food Chemistry* 221:1578–86.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.135>.

Li, B., Lin, Y., Yu, W., Wilson, D. I., & Young, B. R. (2021). Application of mechanistic modelling and machine learning for cream cheese fermentation pH prediction. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 96(1), 125-133.
<https://doi.org/10.1002/jctb.6517>

Ling, H., H. Shi, X. Chen, and K. Cheng. 2022. Detection of the microbial diversity and flavor components of northeastern Chinese soybean paste during storage. *Food Chemistry* 374:131686.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131686>

Liu, H., Z. Chen, M. Ma, Y. Zhang, D. Li, J. Lu, and X. Chen. 2023. Metagenomic analysis of the relationship between microorganisms and flavor development during soy sauce fermentation. *Food Bioscience* 56:103193.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103193>

Liu, Y., Sun, J., Liu, X., Zheng, M., Ma, W., & Jin, G. (2025). A multi-omics technology to the study of lactic acid bacteria responses to environmental stress: the past, current and future trends. *Food Science and Human Wellness*, 14(7), 9250152.
<https://doi.org/10.26599/FSHW.2024.9250152>

Ma, T., & Zhang, A. (2018). Affinity network fusion and semi-supervised learning for cancer patient clustering. *Methods*, 145, 16-24.
<https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2018.05.020>

Mannaa, M., Han, G., Seo, Y. S., & Park, I. (2021). Evolution of food fermentation processes and the use of multi-omics in deciphering the roles of the microbiota. *Foods*, 10(11), 2861. <https://doi.org/10.3390/foods10112861>

Mukherjee, A., Breselge, S., Dimidi, E., Marco, M. L., & Whelan, K. (2024). Fermented Foods and Gastrointestinal Health: Underlying Mechanisms. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. <https://doi.org/10.1038/s41575-023-00869-x>

Nilsson, R. H., Anslan, S., Bahram, M., Wurzbacher, C., Baldrian, P., & Tedersoo, L. (2019). Mycobiome diversity: high-throughput sequencing and identification of fungi. *Nature Reviews Microbiology*, 17(2), 95–109. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0116-y>

Picard, M., Scott-Boyer, M. P., Bodein, A., Périn, O., & Droit, A. (2021). Integration strategies of multi-omics data for machine learning analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 19, 3735-3746. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.06.030>

Pinu, F. R., Goldansaz, S. A., & Jaïne, J. (2019). Translational Metabolomics: Current Challenges and Future Opportunities. *Metabolites*, 9(6), 108. <https://doi.org/10.3390/metabo9060108>

Qi, Q., J. Huang, R. Zhou, Y. Jin, and C. Wu. 2022. Abating biogenic amines and improving the flavor profile of Cantonese soy sauce via Critical Reviews in Food Science and Nutrition 1385 co-culturing *Tetragenococcus halophilus* and *Zygosaccharomyces rouxii*. *Food Microbiology* 106:104056. <https://doi:10.1016/j.fm.2022.104056>.

Rohart, F., Gautier, B., Singh, A., & Lê Cao, K. A. (2017). mixOmics: An R package for ‘omics feature selection and multiple data integration. *PLoS computational biology*, 13(11), e1005752. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005752>

Rué, O., Coton, M., Dugat-Bony, E., Coton, E., & arkadaşları (2023). Comparison of metabarcoding taxonomic markers to

describe fungal communities in fermented foods. *Peer Community Journal*, 3, e56. <https://doi.org/10.24072/pcjournal.321>

Sadurski, J., Polak-Berecka, M., Staniszewski, A., & Waśko, A. (2024). Step-by-Step Metagenomics for Food Microbiome Analysis: A Detailed Review. *Foods*, 13(14), 2216. <https://doi.org/10.3390/foods13142216>

Shang, H., & Liu, Z. P. (2020). Network-based prioritization of cancer genes by integrative ranks from multi-omics data. *Computers in biology and medicine*, 119, 103692. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103692>

Silva, F. A., Cabral, L., de Assis, B. B. T., Ferreira, D. P., Egea, M. B., Pimentel, T. C., & Magnani, M. (2026). Microbiota of foods: a comprehensive review of diversity and potential implications. *Food Research International*, 118899. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118899>

Sizemore, N., Oliphant, K., Zheng, R., Martin, C. R., Claud, E. C., & Chattopadhyay, I. (2024). A digital twin of the infant microbiome to predict neurodevelopmental deficits. *Science Advances*, 10(15), eadj0400. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adj0400>

Song, Z., Du, H., Zhang, Y., & Xu, Y. (2017). Unraveling Core Functional Microbiota in Traditional Solid-State Fermentation by High-Throughput Amplicons and Metatranscriptomics Sequencing. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1294. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01294>

Srinivas, M., O'Sullivan, O., Cotter, P. D., van Sinderen, D., & Hill, C. (2022). The application of metagenomics to study microbial communities and develop desirable traits in fermented foods. *Foods*, 11(20), 3297. <https://doi.org/10.3390/foods11203297>

Stein, R. R., Bucci, V., Toussaint, N. C., Buffie, C. G., Räscher, G., Pamer, E. G., ... & Xavier, J. B. (2013). Ecological modeling

from time-series inference: insight into dynamics and stability of intestinal microbiota. *PLoS computational biology*, 9(12), e1003388. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003388>

Subramanian, I., Verma, S., Kumar, S., Jere, A., & Anamika, K. (2020). Multi-omics data integration, interpretation, and its application. *Bioinformatics and biology insights*, 14. <https://doi.org/10.1177/1177932219899051>

Valdeolivas, A., Tichit, L., Navarro, C., Perrin, S., Odelin, G., Levy, N., ... & Baudot, A. (2019). Random walk with restart on multiplex and heterogeneous biological networks. *Bioinformatics*, 35(3), 497-505. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty637>

Valentino, V., Magliulo, R., Farsi, D., et al. (2024). Fermented Foods, Their Microbiome and Its Potential in Boosting Human Health. *Microbial Biotechnology*, 17(3). <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14428>

Walsh, A. M., Leech, J., Huttenhower, C., Burns, P., & Cotter, P. D. (2023). Integrated molecular approaches for fermented food microbiome research. *FEMS Microbiology Reviews*, 47(2), fuad001. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad001>

Wang, B., Mezlini, A. M., Demir, F., Fiume, M., Tu, Z., Brudno, M., Haibe-Kains, B., & Goldenberg, A. (2014). Similarity network fusion for aggregating data types on a genomic scale. *Nature methods*, 11(3), 333-337. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2810>

Wen, L., Yang, L., Chen, C., Li, J., Fu, J., Liu, G., ... & Cao, Y. (2024). Applications of multi-omics techniques to unravel the fermentation process and the flavor formation mechanism in fermented foods. *Critical reviews in food science and*

nutrition, 64(23), 8367-8383.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2199425>

Wishart, D. S. (2019). Metabolomics for Investigating Physiological and Pathophysiological Processes. *Physiological Reviews*, 99(4), 1819–1875.
<https://doi.org/10.1152/physrev.00035.2018>

Xie, M., J. Wu, F. An, X. Yue, D. Tao, R. Wu, and Y. Lee. 2019. An integrated metagenomic/metaproteomic investigation of microbiota in dajiang-meju, a traditional fermented soybean product in Northeast China. *Food Research International* (Ottawa, Ont.) 115:414–24. <https://doi:10.1016/j.foodres.2018.10.076>.

Yao, D., L. Ma, M. Wu, X. Wang, L. Xu, Q. Yu, and C. Wang. 2022. Effect of microbial communities on the quality characteristics of northeast soybean paste: Correlation between microorganisms and metabolites. *LWT* 164:113648.
<https://doi:10.1016/j.lwt.2022.113648>

Yap, M., Ercolini, D., Álvarez-Ordóñez, A., O'Toole, P. W., O'Sullivan, O., & Cotter, P. D. (2022). Next-Generation Food Research: Use of Meta-Omic Approaches for Characterizing Microbial Communities along the Food Chain. *Annual Review of Food Science and Technology*, 13, 393–418.
<https://doi.org/10.1146/annurev-food-052720-010751>

Zeki, Ö. C., Eylem, C. C., Reçber, T., Kır, S., & Nemutlu, E. (2020). Integration of GC–MS and LC–MS for untargeted metabolomics profiling. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 190, 113509. [10.1016/j.jpba.2020.113509](https://doi.org/10.1016/j.jpba.2020.113509).

Zhang, Y., Zhu, X., Wang, N., Liu, X., Wang, L., & Ning, K. (2025). Synergy of traditional practices and modern technology: Advancing the understanding and applications of microbial resources and processes in fermented foods. *Trends in Food Science*

& *Technology*, 157, 104891.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104891>

Zhou, G., & Xia, J. (2018). OmicsNet: a web-based tool for creation and visual analysis of biological networks in 3D space. *Nucleic acids research*, 46(W1), W514-W522.
<https://doi.org/10.1093/nar/gky510>

BÖLÜM 3

MODİFİYE NİŞASTALAR: YAPISI, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

MUSTAFA SATOUF¹
MEHMET KÖTEN²

Giriş

Nişastanın Genel Tanımı ve Önemi

Nişasta, bitkiler tarafından fotosentez sonucu sentezlenen ve enerji depolama amacıyla biriktirilen doğal bir polisakkarittir. İnsan beslenmesinde temel karbonhidrat kaynaklarından biri olan nişasta, tarihsel süreçte yaygın biçimde kullanılmış olup ticari kullanımının 14. yüzyıla kadar uzandığı bilinmektedir. Sanayi devrimi ile birlikte kullanım alanları önemli ölçüde genişlemiş, özellikle 19. yüzyıldan itibaren buğday ve arpa gibi tahılların yanı sıra patatesten de endüstriyel ölçekte nişasta üretimi gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde ise mısır, küresel nişasta üretiminde en önemli hammadde konumundadır (BeMiller & Whistler, 2009).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Hemşirelik Bölümü, Orcid: 0000-0002-8349-4899

² Doç. Dr., Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Orcid: 0000-0002-8232-8610

Nişasta, tahıl tanelerinin temel bileşenlerinden biri olup birçok bitkisel kaynaktan yüksek oranlarda bulunmaktadır. Ortalama nişasta içeriği; buğdayda %66, mısırdan %71, pirinçte %60, çavdarda %59, arpada %40 ve yulafta %35 düzeyindedir. Bu yüksek içerik ve sağladığı enerji değeri nedeniyle nişasta, tahılların en önemli karbonhidrat fraksiyonu olarak kabul edilmektedir (Elgün & Ertugay, 1997).

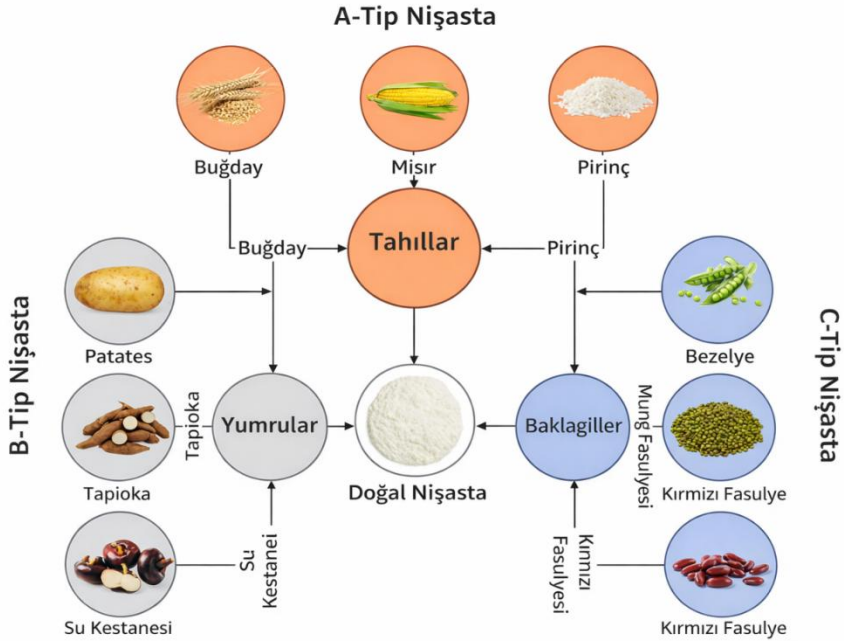
Moleküler düzeyde nişasta, iki temel polisakkarit fraksiyondan oluşmaktadır: doğrusal veya hafif dallanmış zincir yapısına sahip amiloz ve yüksek derecede dallanmış yapıda bulunan amilopektin. Bu iki fraksiyonun oranı ve moleküler organizasyonu, nişastanın fizikokimyasal ve fonksiyonel özelliklerini belirleyen temel faktörlerdir (BeMiller & Whistler, 2009).

Botanik kökene bağlı olarak nişasta granülleri kristal yapı bakımından A-, B- ve C-tipi olarak sınıflandırılmaktadır (şekil 1) (Tester ve ark., 2004; FAO, 2023). A-tipi kristal yapı genellikle tahıllarda; B-tipi yapı yumru ve kök bitkilerde; C-tipi yapı ise baklagillerde yaygın olarak görülmektedir. C-tipi kristal yapı, A ve B tiplerinin kombinasyonu niteliğindedir. Bu kristal yapı farklılıkları; jelatinizasyon sıcaklığı, su absorpsiyon kapasitesi, sindirilebilirlik ve reolojik özellikler üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Jane ve ark., 1999).

Nişastanın başlıca doğal kaynakları arasında tahıllar (%40-90), kökler (%30-70), yumrular (%65-85), baklagiller (%25-50) ile muz ve mango gibi olgunlaşmamış meyveler yer almaktadır (BeMiller & Whistler, 2009; Hoover, 2001). Küresel retim açısından değerlendirildiğinde, nişastanın büyük bölümü mısır, manyok, buğday, pirinç ve patatesten elde edilmektedir. Bu retim içinde mısır nişastası yaklaşık %80–85 ile ilk sırada yer almakta; bunu buğday (%7-8), patates (%6-7) ve manyok (%4-6)

izlemektedir (van der Maarel ve ark., 2002; BeMiller & Whistler, 2009; FAO, 2023).

Şekil 1. Bitki türlerine göre nişasta kaynaklarının çeşitliliğinin şematik gösterimi



Kaynak: FAO, 2023

Nişasta, yalnızca insan beslenmesinde temel bir enerji kaynağı olmakla kalmayıp, aynı zamanda çok yönlü fonksiyonel özellikleri sayesinde farklı endüstriyel alanlarda stratejik bir biyopolimer olarak değerlendirilmektedir. Gıda endüstrisinde koyulaştırıcı, jelleştirici, stabilizatör ve bağlayıcı olarak kullanılmakta; ayrıca emülsiyon ve köpük stabilizasyonu, enkapsülasyon, hacim artırma ve yağ ikamesi gibi önemli teknolojik işlevler üstlenmektedir (Muñoz ve ark., 2015). Bunun yanı sıra kâğıt, tekstil, kimya ve farmasötik sektörlerinde de yaygın kullanım alanı bulmaktadır (Waterschoot ve ark., 2015).

Bununla birlikte doğal nişasta; yüksek sıcaklık, düşük pH, mekanik kesme kuvveti ve tekrarlayan donma-çözünme döngülerine karşı sınırlı stabilite göstermektedir. Bu durum, endüstriyel prosesler sırasında viskozite kaybı, retrogradasyon eğilimi ve tekstürel bozulmalara yol açabilmektedir. Bu sınırlamaların giderilmesi ve fonksiyonel performansın artırılması amacıyla nişasta; fiziksel, kimyasal ve enzimatik yöntemlerle modifiye edilmekte ve bu işlemler sonucunda modifiye nişastalar elde edilmektedir (Abbas ve ark., 2010; Shoukat ve ark., 2025). Günümüzde modifiye nişastalar, yalnızca gıda sektöründe değil, aynı zamanda ilaç, kâğıt, tekstil ve biyoplastik üretimi gibi pek çok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Nişastanın Yapısı ve Özellikleri

Amiloz ve Amilopektin

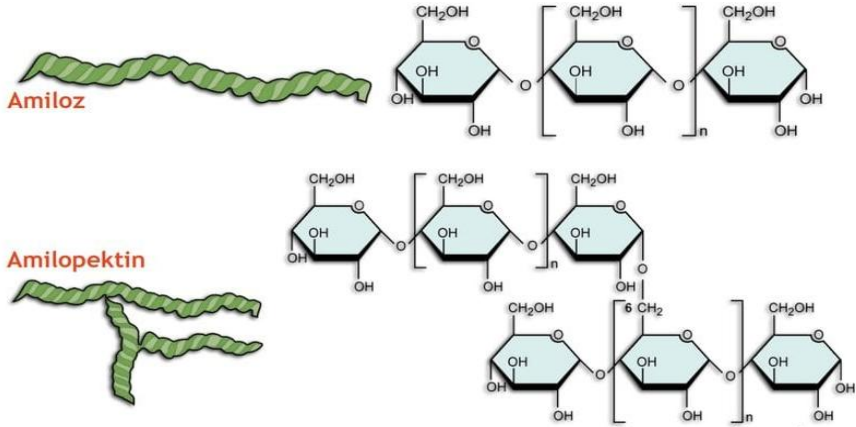
Nişasta, bitkilerde fotosentez sonucu sentezlenen ve enerji depolama amacıyla biriktirilen, α -D-glukoz birimlerinden oluşan bir polisakkarittir. Yapısal olarak iki ana fraksiyondan meydana gelir: amiloz ve amilopektin. Bu iki bileşenin oranı, zincir uzunluğu dağılımı ve nişasta granülü içerisindeki moleküler organizasyonu, nişastanın fiziksel, kimyasal, reolojik ve fonksiyonel özelliklerini belirleyen başlıca faktörlerdir (Pérez & Bertoft, 2010).

Nişasta granülünde kristalin ve amorf bölgelerin oluşumu büyük ölçüde amiloz ve amilopektinin yapısal organizasyonuna bağlıdır. Kristalin bölgeler, amilopektin yan zincirlerinin düzenli çift sarmal (double helix) yapılar oluşturacak şekilde paketlenmesiyle meydana gelmektedir. Buna karşılık amorf bölgelerde dallanma noktaları (α -1,6 bağları) ve amiloz zincirleri yoğunlaşmaktadır. Bu yarı-kristalin yapı, nişastanın jelatinizasyon, şişme ve enzimatik hidroliz davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle amilopektin, su varlığında ısıtma sırasında granül şişmesi,

viskoz pasta oluşumu ve jel yapısının gelişiminde baskın rol oynamaktadır (Robyt, 2008).

Nişastanın yapısı, Şekil 2’de gösterildiği gibi, amiloz ve amilopektinden oluşan iki ana bileşenden oluşmaktadır.

Şekil 2. Nişasta yapısal bileşenleri: Amiloz ve amilopektin



Kaynak: Boahemaa ve ark., 2024; Vamadevan & Bertoft 2020

Amiloz molekülü, α -1,4 glukozidik bağlarla birbirine bağlanmış 2000–12.000 glukoz biriminden oluşan, az sayıda dallanmaya sahip doğrusal bir polimerdir. Yaklaşık 106 moleküler ağırlığa sahiptir ve tek bir indirgenemeyen ucu vardır. Amilopektin molekülü ise amiloza kıyasla yaklaşık %5 oranında α -1,6 glukozidik bağlarla oluşturulmuş dallanmalar içeren, dallanık bir yapıya sahiptir. Moleküler ağırlığı yaklaşık 108 düzeyindedir ve çok sayıda indirgenemeyen uca sahiptir; bu özellik onu amiloza kıyasla β -amilaz tarafından hidrolize daha yatkın kılmaktadır (Chen ve ark., 2025).

Amiloz

Amiloz, yaklaşık 500-2000 glukoz biriminden oluşan, ağırlıklı olarak doğrusal yapıya sahip bir polisakkarit fraksiyonudur. Glukoz birimleri yalnızca α -(1→4) glukozidik

bağlarla birbirine bağlanmış olup bu doğrusal yapı, amilozun çözeltide kararlı bir helikal konformasyon oluşturabilmesine olanak tanımaktadır. Söz konusu helikal yapı; lipit amiloz komplekslerinin oluşumu ve jel mekanizması açısından işlevsel öneme sahiptir. Amiloz içeriği, nişastanın fizikokimyasal ve fonksiyonel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Yüksek amiloz oranı; jel sertliğini ve opaklığını artırmakta, retrogradasyon hızını yükseltmekte, enzime dirençli nişasta (EDN) oluşumunu teşvik etmekte ve granül şişme kapasitesini azaltmaktadır. Amilozun doğrusal zincir yapısı, jel oluşumu sırasında zincirler arası hidrojen bağlarının daha kolay kurulmasını sağlamakta ve depolama süresince retrogradasyon eğilimini artırmaktadır (Pérez & Bertoft, 2010).

Amilopektin

Amilopektin, son derece yüksek molekül ağırlığına sahip, yoğun şekilde dallanmış bir polisakkarittir. Ana zincirler α -(1→4) D-glukozidik bağlarla oluşurken, dallanma noktaları α -(1→6) D-glukozidik bağlar aracılığıyla meydana gelmektedir. Dallanma oranı yaklaşık %4.5-5.9 düzeyindedir. Amilopektinin hiyerarşik ve organize yapısı, nişasta granülünün kristalin bölgelerinin oluşumunda temel rol oynamaktadır. Yan zincirlerin düzenli paketlenmesi çift sarmal yapılar oluşturmakta ve bu yapılar kristal lamelleri meydana getirmektedir. Fonksiyonel açıdan amilopektin; granül şişmesinde, maksimum viskozite gelişiminde, jelatinizasyon davranışında ve pasta stabilitesinde belirleyici ve baskın etkiye sahiptir. Amilopektin içeriğinin yüksek olduğu nişastalar genellikle daha yüksek şişme kapasitesi, daha düşük retrogradasyon eğilimi ve daha stabil jel yapısı göstermektedir (Kent, 1970; Elgün & Ertuğay, 1997; Bashir & Aggarwal, 2019).

Amiloz/Amilopektin Oranı

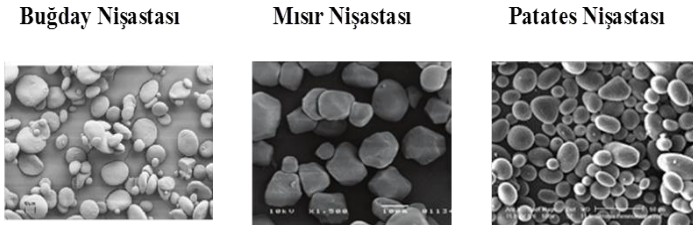
Nişastanın fonksiyonel ve teknolojik özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biri, amiloz ve amilopektin fraksiyonlarının görelî oranıdır. Bu oran; botanik kaynağı, genetik yapıya ve yetiştirme koşullarına bağılı olarak değışmekte olup doğıal nişastalar genel olarak %20-25 amiloz ve %75-80 amilopektin içermektedir. Bununla birlikte söz konusu dağılım, yaklaşık %15:85 ile %35:65 aralığında geniş bir varyasyon sergileyebilmektedir. Mumlu (waxy) tahıllarda amiloz oranı %5'in altına kadar düşebilirken, yüksek amilozlu varyetelerde bu değıer %40'ın üzerine çıkabilmektedir. Amiloz/amilopektin oranındaki değıişimler nişastanın fizikokimyasal ve reolojik davranışını doğrudan etkilemektedir. Jelatinizasyon sıcaklığı açısından yüksek amiloz içeriğı genellikle daha yüksek jelatinizasyon sıcaklığıyla ilişkilendirilmektedir. Viskozite davranışı bakımından amilopektin oranının artmasıyla birlikte granül şişmesi ve pik viskozite değıeri yükselme eğilimi göstermektedir. Retrogradasyon açısından amilozun doğırusal zincir yapısı nedeniyle yüksek amiloz içeren nişastalar daha hızlı ve belirgin retrogradasyon sergilemektedir. Sindirilebilirlik üzerinde ise amiloz oranının artışı dirençli nişasta (RS) oluşumunu teşvik ederek biyoyararlanımı azaltabilmektedir. Tekstürel özellikler bakımından yüksek amilozlu sistemler daha sert ve opak jel yapısı oluştururken, yüksek amilopektinli sistemler daha yumuşak, elastik ve stabil bir jel karakteri sergilemektedir. Tüm bu etkiler göz önünde bulundurulduğunda, amiloz/amilopektin oranı nişastanın hem besinsel kalitesini hem de endüstriyel uygulamalardaki performansını belirleyen kritik bir kompozisyonel faktör olarak değıerlendirilmektedir. Bu nedenle nişastanın kullanım amacı doğırultusunda uygun fraksiyonel bileşime sahip kaynakların seğıilmesi büyük önem taşımaktadır (Tester ve ark., 2004; Yalçın ve ark., 2020).

Genel olarak amiloz, jel yapısını güçlendiren ve retrogradasyonu artıran bir fraksiyon iken; amilopektin viskozite gelişimi ve granül şişmesinde baskın rol oynamaktadır. Bu iki bileşen arasındaki denge, nişastanın hem teknolojik hem de besinsel performansını belirlemektedir (P rez & Bertoft, 2010).

Granül Morfolojisi

Nişasta granülleri, botanik kökene bağlı olarak  ekil, boyut, yüzey özellikleri bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Bu morfolojik özellikler, su absorpsiyonu ve    me kapasitesi, viskozite gelişimi ile enzimatik hidroliz hızı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle nişastanın teknolojik performansının değerlendirilmesinde granül yapısı temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Granül  ekli ve boyut dağılımı türler arasında belirgin biçimde değişmektedir. Buğday ni astasında iki farklı granül popülasyonu (A ve B tipi) bulunurken, mısır nişastası daha homojen ve poligonal granüllerle karakterizedir. Patates nişastası ise geniş bir boyut aralığına sahip, büyük ve oval ya da lentiküler granüllerle karakterizedir. Granül boyutunun büyük olması, yüksek su tutma kapasitesi ve belirgin    me davranışı ile doğrudan ilişkilidir (Hoover, 2001; Rashwan ve ark., 2024).

Şekil 3. Nişasta granül morfolojisi



Kaynak: Rashwan ve ark., 2024

Granülün İç Yapısı

Nişasta granülleri, yalnızca dış morfoloji açısından değil, iç organizasyon bakımından da karmaşık ve hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Her granül; merkezi bir başlangıç noktası olan hilum, konsantrik büyüme halkaları ve kristalin ile amorf lamellerden oluşan yarı-kristalin tabakalar içermektedir. Kristalin bölgeler, amilopektin yan zincirlerinin düzenli çift sarmal yapılar oluşturacak biçimde paketlenmesiyle meydana gelmekte; amorf bölgelerde ise dallanma noktaları ve amiloz zincirleri yoğunlaşmaktadır. Bu hiyerarşik organizasyon, nişastanın ısı ve mekanik işlemler sırasında gösterdiği davranışı doğrudan belirlemektedir. Kristal yapı tipleri, X-ışını difraksiyon (XRD) desenleri esas alınarak A, B ve C olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. A-tipi kristal yapı genellikle tahıllarda görülmekte olup daha kompakt bir paketlenme düzeni sergilemektedir. B-tipi kristal yapı yumru ve kök bitkileri için yaygındır; daha açık bir kristal organizasyon ve yüksek su içeriğiyle ilişkilendirilmektedir. C-tipi kristal yapı ise A ve B tiplerinin kombinasyonu niteliğindedir ve çoğunlukla baklagillerde gözlenmektedir. Sonuç olarak granül morfolojisi ve kristal organizasyon; nişastanın jelatinizasyon sıcaklığı, şişme derecesi, viskozite profili ve sindirilebilirlik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olup endüstriyel uygulamalarda uygun nişasta kaynağının seçilmesinde kritik öneme sahiptir (Pérez & Bertoft, 2010; Bideci, 2022).

Fizikokimyasal Özellikler

Nişastanın fizikokimyasal özellikleri; moleküler yapı, granül organizasyonu ve amiloz/amilopektin oranına bağlı olarak şekillenmektedir. Bu özellikler arasında su tutma kapasitesi, şişme gücü, çözünürlük, yapışkanlık özellikleri (RVA parametreleri) ve reolojik davranış öne çıkmaktadır. Su tutma kapasitesi ve şişme

gücü, granülün ısıyla birlikte su absorbe etme ve hacim kazanma yeteneğini ifade etmekte olup büyük ölçüde amilopektin içeriğiyle doğru orantılı seyretmektedir. Çözünürlük ise jelatinizasyon sürecinde granülden salınan amiloz miktarıyla yakından ilişkilidir. Yapışkanlık özellikleri, özellikle RVA ile belirlenen pik viskozite, çöküş viskozitesi ve nihai viskozite değerleri; nişastanın işleme sırasındaki davranışını ve ürün kalitesini doğrudan yansıtmaktadır. Reolojik davranış ise jel oluşumu, akış özellikleri ve tekstürel kararlılık açısından belirleyici rol oynamaktadır. Amilopektin ağırlıklı nişastalar, granül şişmesinin daha belirgin olması nedeniyle genellikle daha yüksek pik viskozite sergilemektedir. Buna karşın yüksek amilozlu nişastalar, daha düşük şişme kapasitesi ve daha yüksek jel sertliğiyle karakterize edilmektedir. Bu farklılıklar, nişastanın gıda ve endüstriyel uygulamalardaki işlevsel performansını doğrudan belirlemektedir (Tester ve ark., 2004).

Jelatinizasyon ve Retrogradasyon

Doğal nişasta su varlığında ısıtıldığında jelatinizasyon olarak adlandırılan termal bir süreç başlamaktadır. Bu süreçte granüller suyu absorbe ederek şişmekte, kristalin bölgeler kısmen bozulmakta, amilopektine ait çift sarmal yapılar çözünmekte ve amiloz zincirleri granül dışına sızmaktadır. Sonuç olarak viskoz ve yarı düzenli bir yapı oluşmaktadır. Jelatinizasyon davranışı; amiloz/amilopektin oranına, granül morfolojisine, kristal tipine (A, B veya C) ve botanik kaynağa bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir (Pérez & Bertoft, 2010).

Retrogradasyon, jelatinize olmuş nişastanın soğuma ve depolama sürecinde yeniden kristalleşmesi olayıdır. Bu süreçte amiloz zincirleri hızlı bir retrogradasyon eğilimi sergileyerek kısa sürede sertleşmeye yol açmakta; amilopektin ise daha yavaş ancak uzun vadeli bir kristallenme davranışı göstererek ürünlerde bayatlama olgusunu beraberinde getirmektedir. Retrogradasyon;

tekstürel sertleşme, su salımı (sineresis) ve ürün raf ömrünün kısalması üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Tester ve ark., 2004).

Niştastanın Teknolojik Önemi

Niştasta, gıda endüstrisinde kıvam artırıcı, jel oluşturunu, su tutucu ve tekstür düzenleyici olarak yaygın biçimde kullanılan temel bir polisakarittir. Niştastanın teknolojik performansı; amiloz ve amilopektin oranı, moleküler organizasyonu, kristalin yapı tipi ve granül morfolojisi gibi yapısal faktörlere bağılıdır (BeMiller & Whistler, 2009; Tester ve ark., 2004). Bu yapısal parametreler arasında amiloz/amilopektin oranı özellikle belirleyici bir role sahip olup viskozite gelişimi, jel sertliği, retrogradasyon davranışı ve sindirilebilirlik üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Singh ve ark., 2003).

Yüksek Amilozlu Niştastalar

Yüksek amiloz içeren niştastalar, genel olarak %30–70 oranında amiloz barındırmakla birlikte teknolojik açıdan kritik eşik olarak %55 ve üzeri amiloz oranı esas alınmaktadır. Doğrusal zincir yapısı sayesinde bu niştastalar, jel oluşumu sırasında daha yoğun moleküler etkileşimler ve hidrojen bağıları kurarak kompakt bir jel ağı ve yüksek mekanik dayanım geliştirmektedir (Eliasson, 2004). Buna bağılı olarak yüksek amilozlu niştastalar; sert ve dayanıklı jel yapısı, düşük şişme kapasitesi ve pik viskozite, yüksek retrogradasyon eğilimi ile belirgin dirençli niştasta (RS) oluşum potansiyeli ile karakterize edilmektedir. Yüksek amiloz oranı ($\geq$ %55), pişmeye karşı direnci artırmakta, film ve jel oluşturma kapasitesini güçlendirmekte ve retrogradasyon sürecini hızlandırmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle söz konusu niştastalar; fonksiyonel gıda üretiminde, düşük glisemik indeksli ürün formülasyonlarında, biyobozunur film ve biyoplastik uygulamalarında stratejik öneme sahiptir (Hoover, 2001; Singh ve

ark., 2003; Sajilata ve ark., 2006; Biliaderis, 2009; BeMiller & Whistler, 2009).

Yüksek Amilopektinli (Waxy) Nişastalar

Waxy nişastalar, %95-99 oranında amilopektin içeren ve dallanmış moleküler yapıları nedeniyle belirgin teknolojik özellikler sergileyen bir nişasta grubudur (Tester & Morrison, 1990). Jelatinizasyon sırasında granüller yüksek şişme kapasitesi ve belirgin pik viskozite göstermektedir. Bu nişastalar; yüksek granül şişmesi, yüksek pik viskozite, düşük retrogradasyon eğilimi ve yumuşak ile stabil tekstür özellikleri bakımından yüksek amilozlu nişastalardan belirgin biçimde ayrılmaktadır. Amilopektin baskın yapıları sayesinde donma-çözünme stabilitesi yüksek olan waxy nişastalar, soslar, çorbalar, dolgu kremleri ve dondurulmuş gıdalar gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Tablo 1) (Hoover, 2001; Eliasson, 2004; BeMiller & Whistler, 2009; Singh ve ark., 2003).

Nişastanın Kristalin Yapı Tipleri

Nişasta granülleri yarı kristalin bir organizasyona sahip olup kristalin bölgeler esas olarak amilopektinin düzenli çift sarmal yapılarından oluşmaktadır. X-ışını difraksiyonu (XRD) analizleri, nişastada üç temel kristalin yapı tipini ortaya koymuştur: A-tipi, B-tipi ve C-tipi. Bunların yanı sıra amiloz-lipit etkileşimleri sonucu V-tipi kristal yapı da oluşabilmektedir. Her bir kristal tipi; nişastanın botanik kökeniyle doğrudan ilişkili olup jelatinizasyon davranışı, su tutma kapasitesi, enzimatik duyarlılık ve fonksiyonel özellikler üzerinde belirleyici bir etki göstermektedir (Imberty ve ark., 1991; Buléon ve ark., 1998; Tester ve ark., 2004).

A-Tipi Kristal Yapı

A-tipi kristal yapı, başta buğday, mısır ve pirinç olmak üzere tahıl kaynaklı nişastalarda yaygın olarak gözlemlenmektedir. Bu yapı tipi, çift sarmalların daha sıkı yerleşimi nedeniyle kompakt

ve yoğun bir kristalin organizasyon sergilemekte; kristal kafeste görece düşük su molekülü oranı bulunmaktadır. Söz konusu yoğun paketlenme, A-tipi nişastaların B-tipine kıyasla daha düşük jelatinizasyon sıcaklığına ve enzimatik hidrolize karşı nispeten daha yüksek dirence sahip olmasına zemin hazırlamaktadır (Buléon ve ark., 1998; Tester ve ark., 2004).

Tablo 1. Yüksek Amilozlu ve Waxy (Yüksek Amilopektinli) Nişastaların Temel Özellikleri

Özellik	Yüksek Amilozlu Nişasta	Waxy (Yüksek Amilopektinli) Nişasta
Amiloz (%)	$\geq 40-70$	≤ 5 (çoğunlukla %0-2)
Amilopektin (%)	30-60	$\geq 95-100$
Granül Yapısı	Daha kompakt ve yoğun kristalin yapı	Daha düzenli, amilopektin baskın yapı
Jelatinizasyon Sıcaklığı	Yüksek ($>75-80^{\circ}\text{C}$)	Daha düşük ($60-75^{\circ}\text{C}$)
Şişme Gücü	Düşük	Yüksek
Viskozite	Düşük-orta	Yüksek (özellikle pik viskozite)
Jel Oluşumu	Güçlü ve sert jel	Zayıf veya yapışkan jel
Retrogradasyon Eğilimi	Yüksek	Düşük
Sindirim Hızı	Daha yavaş (yüksek RS)	Daha hızlı
Uygulama Alanları	Film, biyoplastik, düşük GI ürünler	Soslar, çorbalar, dolgu kremleri, dondurulmuş gıdalar

Kaynak: BeMiller & Whistler, 2009

B-Tipi Kristal Yapı

B-tipi kristal yapı, patates başta olmak üzere yumru ve kök bitkilerinde yaygın biçimde gözlemlenmektedir. A-tipine kıyasla daha gevşek ve hidratasyona elverişli bir kristal organizasyona sahip olan B-tipi yapıda, kristal kafes daha fazla boşluk ve yüksek su içeriği barındırmaktadır. Bu durum, B-tipi nişastaların şişme

kapasitesi ve su bağlama yeteneğinin görece yüksek olmasına, dolayısıyla su penetrasyonuna ve enzimatik hidrolize karşı daha duyarlı bir davranış sergilemesine yol açmaktadır. XRD analizinde yaklaşık 5,6°, 17°, 22° ve 24° (2θ) civarında karakteristik pikler veren bu yapı, yüksek nem koşullarında oluşma eğilimindedir (Buléon ve ark., 1998; Tester & Morrison, 1990; Hoover, 2001).

Tablo 2. A-Tipi ve B-Tipi Nişastaların Karşılaştırılması

Özellik	A-Tipi	B-Tipi
Görüldüğü kaynak	Tahıllar (buğday, mısır)	Patates, muz, bazı yumrular
Paketlenme	Daha yoğun	Daha gevşek
Kristal su içeriği	Daha düşük	Daha yüksek
Şişme kapasitesi	Görece düşük	Daha yüksek
Enzimatik duyarlılık	Daha düşük	Daha yüksek

Kaynak: Imberty ve ark., 1991; Tester ve ark., 2004

C-Tipi Kristal Yapı

C-tipi kristal yapı, A ve B tipi kristal örüntülerinin bir arada bulunduğu geçiş formu olarak tanımlanmakta olup genellikle baklagil nişastalarında gözlemlenmektedir. Kristalin bölgelerde hem A hem de B paternine ait difraksiyon pikleri tespit edilmekte; bu durum C-tipi nişastaların jelatinizasyon davranışının iki saf kristal tipinin ara özelliklerini yansıtmaya neden olmaktadır. Dolayısıyla C-tipi nişastalar, fizikokimyasal ve fonksiyonel açıdan A ile B tipi arasında konumlanmaktadır (Tester & Morrison, 1990; Alcázar-Alay ve ark., 2015).

Amiloz-Lipit Kompleksleri ve V-Tipi Kristal Yapı

Amiloz molekülleri, helikal yapı oluşturabilme yetenekleri sayesinde serbest yağ asitleri veya monogliseritleri iç boşluklarına alarak amiloz-lipit kompleksleri meydana getirebilmektedir. XRD analizinde V-tipi kristal yapı olarak tanımlanan bu kompleksler, özellikle yüksek amiloz içeren nişastalarda daha belirgin biçimde

ortaya çıkmaktadır. V-tipi kristal yapının nişastanın fonksiyonel özellikleri üzerinde çok yönlü etkileri bulunmaktadır: sindirilebilirliği azaltabilmekte, retrogradasyon davranışını değiştirebilmekte, jel yapısı ile tekstürel özellikleri etkileyebilmekte ve dirençli nişasta (özellikle RS5 fraksiyonu) oluşumuna katkı sağlayabilmektedir (Jane ve ark., 1999; Eliasson, 2004).

Kristalin Yapının Teknolojik Önemi

Kristalin yapı tipi, nişastanın jelatinizasyon davranışı, şişme kapasitesi, sindirilebilirliği ve enzimatik hidroliz direnci üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Gıda sistemlerinde kıvam oluşturma kapasitesi büyük ölçüde kristalin organizasyona bağlıdır. Benzer biçimde soğutma ve depolama sürecindeki retrogradasyon hızı ile şiddeti, kristal tipiyle doğrudan ilişkilidir. Su tutma kapasitesi açısından da kristalin yapı belirleyici konumdadır; bu etki ürün stabilitesi ve tekstürel kalite üzerinde somut biçimde kendini göstermektedir. Sos, tatlı ve fırın ürünleri gibi farklı gıda sistemlerinde yapı oluşumunu yönlendiren jelleşme yeteneği de kristalin organizasyona bağlı olarak şekillenmektedir. Tüm bu işlevsel etkileri göz önünde bulundurulduğunda, nişastanın kristalin organizasyonunun hem doğal kullanım alanlarını belirlediği hem de fonksiyonel performansın iyileştirilmesine yönelik modifikasyon gereksinimini ortaya koyduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda kristal yapı tipi, uygun nişasta kaynağının seçimi ve işleme koşullarının tasarımında temel bir referans parametresi olarak değerlendirilmektedir (Pérez & Bertoft, 2010).

Modifiye Nişastanın Tanımı ve Modifikasyonun Amaçları

Modifiye nişasta, doğal nişastanın fiziksel, kimyasal veya enzimatik yöntemlerle yapısının kontrollü biçimde değiştirilmesi sonucu elde edilen nişasta türevlerini ifade etmektedir. Bu işlemler

aracılığıyla nişastanın fonksiyonel özellikleri iyileştirilmekte ve belirli endüstriyel uygulamalara uygun hâle getirilmektedir (BeMiller & Whistler, 2009).

Doğal nişasta, su varlığında ısıtıldığında jelatinizasyon özelliği göstermekle birlikte yüksek sıcaklık, düşük pH, mekanik kesme kuvvetleri ve dondurma çözündürme döngülerine karşı sınırlı bir stabiliteye sahiptir. Bunun yanı sıra retrogradasyon eğilimi ve depolama sırasında ortaya çıkan sinerezis, tekstürel bozulmalara ve kalite kayıplarına yol açabilmektedir. Suda sınırlı çözünürlük göstermesi ve proses koşullarında viskozite kaybına uğraması da kullanım alanlarını önemli ölçüde kısıtlamaktadır (Biliaderis, 2009; Berski ve ark., 2011). Bu sınırlamaları gidermek amacıyla uygulanan modifikasyon işlemleri, nişasta polimer zincirlerinde kontrollü yapısal değişiklikler oluşturarak daha kararlı ve fonksiyonel açıdan geliştirilmiş ürünlerin elde edilmesini sağlamaktadır (López ve ark., 2010; Sweedman ve ark., 2013).

Modifikasyonun Amaçları ve Fonksiyonel Avantajları

Modifiye nişastalar, doğal nişastanın proses ve depolama koşullarındaki sınırlı performansını iyileştirmek ve spesifik endüstriyel gereksinimlere uygun fonksiyonel özellikler kazandırmak amacıyla geliştirilmiştir. Modifikasyon işlemleri; nişastanın ısı, asit ve mekanik kesme kuvvetlerine karşı dayanıklılığını artırmakta, proses boyunca viskoziteyi daha kontrollü ve stabil hâle getirmekte, jel yapısının mekanik ve depolama stabilitesini geliştirmekte, su tutma kapasitesini yükseltmekte ve jelatinizasyon davranışını kontrol altına almaktadır. Bunların yanı sıra retrogradasyon geciktirilerek sinerezis azaltılmakta, donma-çözünme stabilitesi güçlendirilmekte ve tekstürel stabilite korunmaktadır; tüm bu iyileştirmeler ürünlerin raf ömrünün uzatılmasına önemli katkı sağlamaktadır (Shoukat ve ark., 2025).

Modifikasyon yöntemleri arasında çapraz bağlanma (cross-linking) reaksiyonları, granül yapısının bütünlüğünü güçlendirerek asidik ortam ve mekanik kesme koşullarına karşı direnci artırırken; asetilasyon ve hidroksipropilasyon gibi substitüsyon işlemleri zincirler arası yeniden düzenlenmeyi sınırlandırarak retrogradasyonu azaltmakta ve donma-çözünme stabilitesini iyileştirmektedir (Hoover, 2001; Ashogbon & Akintayo, 2014). Bu fonksiyonel iyileştirmeler sayesinde modifiye nişastalar; yüksek sıcaklıkta işlenen, asidik ortamda formüle edilen veya uzun süreli depolamaya tabi tutulan ürünlerde koyulaştırıcı, stabilizatör, yapı kazandırıcı ve emülgatör olarak üstün performans göstermektedir (Singh ve ark., 2007; Biliaderis, 2009; Sweedman ve ark., 2013; Ashogbon & Akintayo, 2014).

Fiziksel Modifikasyon Yöntemleri

Fiziksel modifikasyon yöntemleri, nişastanın kimyasal yapısını değiştirmeksizin sıcaklık, nem, basınç, mekanik kesme veya yüksek enerji uygulamaları aracılığıyla granül organizasyonunda kontrollü yapısal değişimler oluşturmayı hedefleyen işlemleri kapsamaktadır. Bu yöntemler; ön jelatinizasyon, ısı-nem işlemi (HMT), annealing (ANN), yüksek basınç uygulaması, ultrason, mikrodalga, soğuk plazma ve pulsed electric field (PEF) gibi teknikleri içermektedir. Kimyasal reaktif kullanılmaması nedeniyle insan tüketimine yönelik ürünlerde güvenli kabul edilmekte ve "clean label" ürün geliştirme stratejileriyle uyum sağlamaktadır. Bu işlemler sırasında nişastanın kristalin ve amorf bölgelerinde moleküler reorganizasyon meydana gelmekte; söz konusu değişimler reolojik özelliklerini, termal davranışını, pastalama karakteristiğini ve su tutma kapasitesini doğrudan etkilemektedir (Huber & BeMiller, 2001; Singh ve ark., 2007; Wang ve ark., 2023).

Ön Jelatinize Nişasta (Pre-Gelatinized Starch, PGS)

Ön jelatinize nişasta (PGS), doğal nişastanın tam jelatinizasyon gerçekleşene kadar ısıtılması ve ardından tamburlu kurutma, sprey kurutma veya ekstrüzyon gibi yöntemlerle kurutulması sonucu elde edilen fiziksel olarak modifiye edilmiş bir nişastadır. İşlem sırasında kristalin yapı büyük ölçüde bozulmakta, granül yapısı parçalanmakta ve birefringence özelliği kaybolarak daha amorf ve reaktif bir yapı oluşmaktadır (Singh ve ark., 2003; Singh ve ark., 2007).

Jelatinizasyonun önceden tamamlanmış olması nedeniyle PGS; soğuk suda hızlı hidrasyon, ısıtma gerektirmeden viskozite oluşturma, yüksek çözünürlük ve artmış şişme kapasitesi gibi belirgin fonksiyonel özellikler sergilemektedir. Ancak fonksiyonellik; uygulanan pişirme sıcaklığı ve süresi, kullanılan kurutma yöntemi ve nişasta kaynağına (mısır, buğday, patates vb.) bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir (Ashogbon & Akintayo, 2014). Bu özellikleri sayesinde PGS; bebek mamaları, hazır çorbalar, soslar, tatlı karışımları ve toz içecek bazlı ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Majzoobi ve ark., 2011).

Hidrotermal İşlem (Heat-Moisture Treatment, HMT)

Hidrotermal işlem (HMT), nişastanın düşük nem içeriğinde (genellikle %10-35, w/w) jelatinizasyon sıcaklığına yakın veya bu sıcaklığın üzerinde (80-140 °C) 15 dakika ile 16 saat arasında değişen sürelerde ısıtılmasına dayanan fiziksel bir modifikasyon yöntemidir (Jacobs & Delcour, 1998). Bu süreçte granül bütünlüğü korunmakta, jelatinizasyon gerçekleşmemekte; ancak kristalin ve amorf bölgelerde moleküler düzeyde önemli yeniden düzenlenmeler meydana gelmektedir (Hoover, 2010; Hormdok & Noomhorm, 2007; Jyothi ve ark., 2010).

Bu kontrollü yapısal reorganizasyon sonucunda HMT uygulanmış nişastalar; daha yüksek termal stabilite, düşük şişme

kapasitesi, kontrollü viskozite gelişimi, artmış mekanik dayanıklılık ve gelişmiş proses toleransı sergilemektedir. Bu nedenle HMT, yüksek sıcaklıkta işlenen ürünlerde, ekstrüzyon uygulamalarında ve düşük viskoziteli ancak yapısal olarak stabil formülasyonlarda belirgin teknolojik avantaj sağlamaktadır (Jayakody & Hoover, 2008; Roudaut, 2009).

HMT sonrası meydana gelen yapısal ve fizikokimyasal değişimler çeşitli analitik tekniklerle ortaya konmaktadır. XRD analizlerinde kristalin tip dönüşümleri (örneğin B-tipten A-tipe geçiş) gözlenebilmekte; DSC analizlerinde ise jelatinizasyon başlangıç (To), tepe (Tp) ve bitiş (Tc) sıcaklıklarında artış ile entalpi (ΔH) değerlerinde değişimler rapor edilmektedir (Hoover, 2010; Zavareze & Dias, 2011). Bu bulgular, HMT'nin granül içindeki moleküler mobilitayı sınırlandırarak daha düzenli, stabil ve termal açıdan dayanıklı bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

HMT'ye verilen yanıtın boyutu, nişastanın botanik kaynağına bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Amiloz/amilopektin oranı, amilopektinin dallanma derecesi, granül içi moleküler organizasyon ve kristalin tip (A-, B- veya C-tipi) gibi faktörler bu yanıtı doğrudan belirlemektedir. Mısır nişastasında jelatinizasyon sıcaklığında belirgin artış gözlenirken, buğday nişastasında orta düzeyde reorganizasyon meydana gelmektedir. Pirinç nişastası daha kompakt kristalin yapısı nedeniyle sınırlı şişme gösterirken, patates nişastasında B-tip kristal yapıdan A-tipe dönüşüm eğilimi rapor edilmektedir (Hoover, 2010).

Tavlama (Annealing, ANN)

Annealing (ANN), nişasta granüllerine yüksek su içeriği (%40-76, w/w) varlığında ve jelatinizasyon sıcaklığının (Tgel) altında uygulanan kontrollü bir ısıl işlemdir. Bu yöntem, sonuçları nem oranı, sıcaklık ve süre gibi parametrelere bağlı olarak değişmekte olup düşük nem koşullarında gerçekleştirilen HMT'den

bu açıdan ayrılmaktadır (Jacobs & Delcour, 1998; Tester & Debon, 2000).

ANN'nin temel amacı, suyun plastikleştirici etkisiyle granül içerisindeki moleküler mobilitayı artırarak fiziksel yeniden düzenlenme sağlamaktır. Granül hidrasyonu, nişastanın camı yapıdan daha mobil bir faza geçmesine neden olmakta; özellikle amorf bölgelerde artan zincir hareketliliği kristalin bölgelerde yeniden organizasyonu tetiklemektedir. Bu süreçte amiloz ve amilopektin zincirleri daha düzenli konfigürasyonlara yönelmekte, çift heliks yapılar stabilize olmakta, kristal lamellerin düzenliliği artmakta ve granül içi moleküler gerilim azalmaktadır (Tablo 3) (Chen ve ark., 2014).

İşlem boyunca granül bütünlüğü korunmakta ve jelatinizasyon gerçekleşmemektedir. Bu kontrollü reorganizasyon sonucunda jelatinizasyon başlangıç (To) ve tepe (Tp) sıcaklıklarında artış, jelatinizasyon sıcaklık aralığında daralma, termal stabilitede artış ile şişme gücü ve çözünürlükte azalma gibi değişimler rapor edilmektedir (Tablo 3) (Jayakody & Hoover, 2008).

Tablo 3. Annealing (Tavlama) Uygulamalarının Nişasta Özelliklerine Etkisi

Nişasta Kaynağı	Parametreler	Sonuçlar	Referans
Su kestanesi (<i>Eleocharis dulcis</i>)	65 °C, 24 saat, %35 (w/v)	Şişme kapasitesi, çözünürlük ve viskozite azalmıştır.	Yadav ve ark., 2013
Yam nişastası	50 °C, 24 saat, %33 (w/v)	Granül yoğunluğu ve şişme kapasitesi azalmıştır.	Falade & Ayetigbo, 2015
PLA + ticari mısır nişastası karışımı	50-120°C, %40 (w/v),	Kristallilik artmıştır; ısıl dayanım ve mekanik özellikler iyileşmiştir.	Lv ve ark., 2015

Modifikasyon Sonrası Genel Değişimler

DSC analizlerinde jelatinizasyon başlangıç (To), pik (Tp) ve son (Tc) sıcaklıklarında artış ile jelatinizasyon sıcaklık aralığında daralma gözlenirken; XRD analizlerinde kristalinite derecesinde hafif artış bildirilmektedir (Jacobs & Delcour, 1998; Chen ve ark., 2014). Bu durum, kristalin bölgelerde daha düzenli, homojen ve termodinamik açıdan daha stabil çift heliks yapıların oluştuğuna işaret etmektedir. Fizikokimyasal etkiler açısından değerlendirildiğinde; granül boyutunda hafif artış, jelatinizasyon sıcaklığında genel yükselme ve termal stabilitede artış gözlenirken, şişme kapasitesi ve çözünürlükte kontrollü azalma, pastalama özelliklerinde daha dengeli viskozite gelişimi ve enzimatik sindirilebilirlikte farklılaşma rapor edilmektedir (Tester & Debon, 2000).

ANN ve HMT farklı mekanizmalarla etki göstermektedir. ANN, yüksek nem ortamında moleküler yeniden düzenlenme sağlayarak daha homojen ve termal açıdan stabil kristalin bölgeler oluştururken; HMT düşük nem koşullarında zincir mobilitesini sınırlandırarak granül içinde daha kompakt ve dirençli bir yapı meydana getirmekte ve bazı durumlarda kristalin tip dönüşümüne yol açabilmektedir (Hoover, 2010). Her iki yöntem de kimyasal reaktif içermemesi nedeniyle clean label uygulamaları açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Tablo 4) (Jacobs & Delcour, 1998; Zavareze & Dias, 2011).

Termal Olmayan Fiziksel Modifikasyon Yöntemleri

Geleneksel ısı işlemleri bazı besin öğelerinde kayıplara ve duyu özelliklerinde değişimlere yol açabildiğinden, son yıllarda termal olmayan fiziksel modifikasyon teknolojilerine ilgi giderek artmaktadır. Bu yöntemler; yüksek enerji uygulamaları aracılığıyla granül yapısında kontrollü değişimler oluşturmada, kimyasal reaktif kullanmaksızın modifikasyon sağlamak ve besin değerini

koruma potansiyeli taşımaktadır. Enerji temelli olmaları ve kimyasal kalıntı riski taşımamaları nedeniyle sürdürülebilir ve clean label üretim stratejileriyle uyumludurlar (Li ve ark., 2014; Zheng, 2025).

Tablo 4. Annealing (ANN) ve Isı-Nem İşlemi (HMT)'nin Karşılaştırılması

Özellik	Annealing (ANN)	Isı-Nem İşlemi (HMT)
Su içeriği	Yüksek (%40-76, w/w)	Düşük (%10-35, w/w)
Sıcaklık	Jelatinizasyon sıcaklığının (Tgel) altında	Tgel altında veya civarında
Granül bütünlüğü	Korunur	Korunur
Jelatinizasyon	Gerçekleşmez	Gerçekleşmez
Temel mekanizma	Moleküler mobilite artışı ve kristalin reorganizasyon	Moleküler mobilitenin kısıtlanması ve iç reorganizasyon
Kristalin yapı	Kristalinite derecesinde hafif artış	Kristalin tip dönüşümü (ör. B → A) görülebilir
DSC sonuçları	To, Tp, Tc artar; sıcaklık aralığı daralır	To, Tp, Tc artar; ΔH değişebilir
Şişme kapasitesi	Kontrollü veya hafif azalma	Belirgin azalma
Viskozite	Daha stabil ve kontrollü	Genellikle düşüş ve daha yüksek stabilite
Retrogradasyon	Azalma eğilimi	Çoğunlukla azalma
Enzimatik sindirilebilirlik	Erişilebilirlik değişebilir	Genellikle azalır (daha kompakt yapı)
Endüstriyel avantaj	Clean label, kontrollü tekstür	Yüksek termal stabilite, düşük şişme
İşlem süresi	Görece uzun	Orta-uzun
Enerji gereksinimi	Yüksek	Orta

Kaynak: Fonseca ve ark., 2021

Yüksek Basınç Uygulaması (High Hydrostatic Pressure, HHP)

Yüksek basınç uygulaması (HHP), nişasta granüllerinde kristalin ve amorf bölgeler arasındaki moleküler etkileşimleri değiştirerek yapısal reorganizasyona neden olmaktadır. Uygulanan basınca (genellikle 400-900 MPa) bağlı olarak çift heliks yapılarında kısmi yeniden düzenlenme meydana gelmekte, amorf bölgelerde yoğunlaşma artmakta ve bazı durumlarda kontrollü jelatinizasyon benzeri değişimler gözlenebilmektedir. Bu yapısal değişimler sonucunda şişme kapasitesi sınırlanabilmekte, buna karşılık pasta viskozitesinde artış rapor edilebilmektedir. HHP'nin etkisi; uygulanan basınç düzeyi, işlem sıcaklığı ve süre gibi parametrelere bağlı olarak değişmekte olup bu faktörler granül içindeki moleküler reorganizasyonun derecesini belirlemektedir (Li ve ark., 2014; Zheng, 2025).

Ultrason

Ultrasonik modifikasyon, akustik kaviteasyon mekanizmasına dayanmaktadır. Sıvı ortamda oluşan mikro kabarcıkların büyüüp ani şekilde çökmesi sonucunda ortaya çıkan yüksek lokal enerji; nişasta granüllerinde yüzey erozyonu, amorf bölgelerde parçalanma ve moleküler zincirlerde kısmi depolimerizasyona yol açabilmektedir. Bu yapısal değişimler nişastanın çözünürlük, şişme davranışı ve viskozite özelliklerinde belirgin farklılıklara neden olmakta; partikül boyutunu küçülterek granülün gıda formülasyonlarında kullanımını kolaylaştırmaktadır (Hou ve ark., 2023). Modifikasyon derecesi; uygulanan frekans, güç yoğunluğu ve işlem süresine bağlı olarak değişmekte olup parametrelerin optimize edilmesi hedeflenen fonksiyonel özelliklerin kontrolünü mümkün kılmaktadır (Luo ve ark., 2008; Zhu ve ark., 2023).

Soğuk Plazma

Soğuk plazma teknolojisi, iyonize gaz ortamında oluşan reaktif türler (serbest radikaller, iyonlar ve UV fotonları) aracılığıyla nişasta granülünün özellikle yüzey bölgesinde kimyasal ve fiziksel değişimler meydana getiren termal olmayan bir modifikasyon yöntemidir. Yüksek enerjili bu reaktif türler; yüzey oksidasyonu, yeni fonksiyonel grup oluşumu, hidrofilite değişimi ve yüzey enerjisinde artış gibi etkiler oluşturarak granülün yüzey özelliklerini yeniden yapılandırmaktadır. Granülün içyapısını büyük ölçüde korurken yüzey özelliklerini kontrollü biçimde değiştirebilmesi, soğuk plazmayı hedeflenmiş fonksiyonel iyileştirmeler açısından dikkat çekici kılmaktadır (Bogaerts ve ark., 2002; Ekafitri ve ark., 2025).

Kimyasal Modifikasyon

Kimyasal modifikasyon; nişasta molekülündeki hidroksil (–OH) gruplarının çeşitli kimyasal reaktifler aracılığıyla dönüştürülmesine dayanan bir yöntemdir. Bu işlem, granül bütünlüğünü tamamen bozmadan moleküler düzeyde fonksiyonel grup değişimi oluşturur. Söz konusu dönüşümler; nişastanın jelatinizasyon davranışı, retrogradasyon eğilimi, macun (pasta) özellikleri ve proses stabilitesi üzerinde önemli iyileşmelere yol açmaktadır (Singh ve ark., 2007; Zhu, 2015).

Kimyasal modifikasyon yöntemleri başlıca; çapraz bağlama (cross-linking), esterifikasyon, eterifikasyon, oksidasyon ve konversiyon (asit hidrolizi, dekstrinizasyon) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda nişastanın ısı, asit ve mekanik kesme kuvvetlerine karşı direnci artırılmakta; jel yapısı, dondurma-çözündürme ve depolama stabilitesi iyileştirilmektedir (López ve ark., 2010). Kimyasal modifikasyon; özellikle yüksek sıcaklıkta işlenen, asidik ortamda formüle edilen

veya uzun süreli depolanan ürünlerde doğal nişastaya kıyasla daha kontrollü bir performans sergilemektedir.

Esterifikasyon

Esterifikasyon, nişasta molekülündeki hidroksil ($-OH$) gruplarının asit anhidritleri veya asit klorürleri ile reaksiyonu sonucu ester bağlarının ($-O-CO-R$) oluşmasına dayanan bir kimyasal modifikasyon yöntemidir. Bu reaksiyon, moleküler düzeyde substitüsyon sağlayarak nişastanın hidrofilik/hidrofobik dengesini ve buna bağlı fonksiyonel özelliklerini köklü biçimde değiştirmektedir. Esterifikasyon işlemi sonucunda nişastanın jelatinizasyon davranışı, retrogradasyon eğilimi ve donma-çözünme stabilitesi kontrol edilebilmektedir. Özellikle asetillenmiş nişastalarda hidroksil gruplarının asetil gruplarıyla ikame edilmesi, zincirler arası hidrojen bağı oluşumunu zayıflatarak retrogradasyon eğilimini azaltmakta; bununla birlikte su tutma kapasitesi ve depolama stabilitesi belirgin biçimde artmaktadır (Wurzburg, 1986; Stephen, 2006).

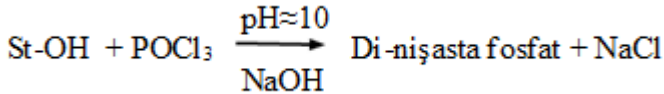
Çapraz Bağlama (Cross-Linking)

Çapraz bağlama, iki veya daha fazla fonksiyonel grup içeren reaktifler aracılığıyla farklı nişasta zincirleri arasında kovalent bağ oluşturulması işlemidir. Bu işlem sonucunda üç boyutlu ağ yapısı meydana gelmekte ve granül yapısı güçlenmektedir. Çapraz bağlamanın başlıca yapısal ve fonksiyonel etkileri şunlardır: artmış moleküler kütle ve polimerizasyon derecesi, azalmış şişme kapasitesi, artmış ısı ve mekanik dayanım ve retrogradasyona karşı direnç. Çapraz bağlı nişastalar, özellikle yüksek sıcaklık, asidik ortam ve yoğun mekanik kesme koşullarında üstün stabilite göstermektedir (Wurzburg, 1986; Stephen, 2006; Punia Bangar ve ark., 2024; Punia Bangar ve ark., 2026).

Fosfor Bazlı Çapraz Bağlama Reaksiyonları

Fosfor Oksiklorit (POCl₂) ile Çapraz Bağlama

Bazik ortamda (pH ≈ 10) fosfor oksiklorit (POCl₂), nişastanın -OH grupları ile reaksiyona girerek zincirler arasında fosfodiester köprüleri (-O-P-O-) oluşturur ve di-nişasta fosfat yapısı meydana gelir.



Tipik uygulamada nişasta bazında %0.15-0.25 POCl₃ kullanılır. İşlem %40'lık nişasta süspansiyonunda, pH ≈ 10 (NaOH ile ayarlanmış) ve yaklaşık 5 °C'de gerçekleştirilir. Reaksiyon sonrası nötralizasyon, yıkama ve kurutma adımları uygulanmaktadır (Çağlarımak & Çakmaklı, 1993). Bu yöntem granül stabilitesini artırarak asit, ısı ve mekanik kesmeye karşı direnci önemli ölçüde geliştirmektedir.

Sodyum Trimetafosfat (STMP) ile Çapraz Bağlama

Sodyum tri metafosfat (STMP), bazik ortamda nişasta zincirleri arasında fosfodiester bağları oluşturarak distarch phosphate (E1412) üretimini sağlar.



Uygulamada genellikle %2 STMP kullanılır; işlem pH 10-11 aralığında, yaklaşık 50 °C'de ve 1 saat süreyle gerçekleştirilmektedir. Bu koşullar yapısal stabilitenin artırılması ve hedeflenen fonksiyonel özelliklerin elde edilmesi için yaygın olarak tercih edilmektedir (Alcázar-Alay & Meireles, 2015).

Epiklorohidrin ile Çapraz Bağlama

Epiklorohidrin, epoksit halkası içeren bifonksiyonel bir reaktif olup nişastanın kimyasal çapraz bağlanmasında yaygın

biçimde kullanılmaktadır. Bazik ortamda nişastanın hidroksil –OH grupları epoksit halkasını açarak zincirler arasında kararlı bir eter köprüsü oluşturmaktadır. Bu reaksiyon sonucunda aşağıdaki bağlantı yapısı meydana gelmektedir:

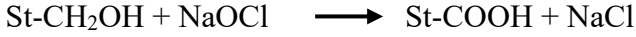


Epiklorohidrin ile çapraz bağlama yöntemi, fosfat içermemesi bakımından diğer çapraz bağlama reaktiflerinden ayrılmaktadır. Bununla birlikte bu yöntemle oluşturulan eter köprüleri, fosfat ester bağlarına kıyasla daha güçlü ve kimyasal açıdan daha stabil bir yapı sergilemektedir. Bu durum, modifiye nişastaya yüksek termal ve mekanik stabilite kazandırmaktadır. Sonuç olarak epiklorohidrin ile çapraz bağlı nişastalar, özellikle yoğun proses koşullarında yapısal bütünlüğünü koruyabilen ve endüstriyel uygulamalar için üstün dayanıklılık profili sunan sistemler oluşturmaktadır (Wurzburg, 1986; Stephen, 2006).

Tablo 5'te görüldüğü üzere, her iki reaktif de bazik ortamda nişasta zincirleri arasında çapraz bağ oluşturmakla birlikte bağ tipi, reaksiyon pH'ı, sağlanan stabilite düzeyi ve gıda uygulamalarındaki kullanım koşulları bakımından belirgin farklılıklar sergilemektedir. STMP fosfodiester bağı aracılığıyla orta-yüksek düzeyde stabilite sağlarken ve gıda endüstrisinde yaygın biçimde kullanılırken; epiklorohidrin daha güçlü eter köprüleri oluşturarak yüksek termal ve mekanik stabilite kazandırmakta, ancak gıda uygulamalarında daha kontrollü koşullar gerektirmektedir.

Oksidasyon

Oksidasyon, nişasta molekülündeki primer hidroksil (-CH₂OH) gruplarının karbonil (-C=O) ve karboksil (-COOH) gruplarına dönüştürülmesine dayanan bir kimyasal modifikasyon yöntemidir. Ticari uygulamalarda en yaygın oksidant sodyum hipoklorit (NaOCl) olup reaksiyon genellikle kontrollü pH ve sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmektedir (Zhu, 2015).



Tablo 5. STMP ve epiklorohidrin ile gerçekleştirilen çapraz bağlama yöntemlerinin temel özellikleri açısından karşılaştırılması

Özellik	STMP	Epiklorohidrin
Bağ tipi	Fosfodiester	Eter
pH	10-11	11-12
Stabilite	Orta-yüksek	Yüksek
Gıda kullanımı	Yaygın	Daha kontrollü

Kaynak: Wurzburg, 1986

Oksidasyon sürecinde kısmi depolimerizasyon meydana gelmekte ve zincir uzunluğu azalabilmektedir. Başlıca fonksiyonel sonuçlar şunlardır: düşük macun (pasta) viskozitesi, yüksek jel berraklığı ve azalmış retrogradasyon eğilimi. Okside nişastalar, özellikle düşük viskozite ve yüksek berraklık gerektiren kuru ürünlerde ve kaplama sistemlerinde tercih edilmekte; parlaklık ve şeffaflık kazandırmaktadır (Tablo 6) (BeMiller & Whistler, 2009; Zhu, 2015).

Tablo 6. Kimyasal Modifikasyonda Türleri ve Fonksiyonel Etkileri

Modifikasyon Türü	Reaktif	Temel Yapısal Etki	Fonksiyonel Sonuç
Asetillenmiş nişasta	Asetik anhidrit	-OH ikamasi	Donma-çözünme stabilitesinde artış, azalmış retrogradasyon
Fosfat esterleri	POCl ₃ , STMP vb.	Fosfodiester köprüleri (çapraz bağ)	Artmış ısı, asit ve mekanik stabilite
Okside nişasta	NaOCl vb.	Karbokil oluşumu	Düşük viskozite, yüksek berraklık

Kaynak: BeMiller & Whistler, 2009

Not: Asetillenmiş nişastalar, düşük retrogradasyon eğilimi ve gelişmiş donma-çözünme stabilitesi nedeniyle özellikle süt ürünleri ve dondurulmuş gıdalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Lawal, 2004).

Alkali ortamda enolizasyon ve kısmi hidroliz görülebilirken, nötral koşullarda daha kontrollü oksidasyon ürünleri oluşmaktadır (Radley, 1968).

Konversiyon ve Dekstrinizasyon

Asit hidrolizi gibi konversiyon işlemleri, nişastanın molekül ağırlığını düşürerek viskoziteyi kontrol eder. Dekstrinizasyon ise kuru ısıl işlemle düşük molekül ağırlıklı dekstrinlerin üretilmesini sağlar. Bu ürünler temel olarak yapıştırıcı ve kaplama endüstrisinde kullanılmaktadır (Singh ve ark., 2007).

Endüstriyel Önemi ve Güncel Yaklaşımlar

Kimyasal olarak modifiye edilmiş nişastalar, endüstriyel proses koşullarına karşı geliştirilmiş stabilite özellikleri sayesinde gıda ve biyomalzeme endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle yüksek sıcaklıkta işlenen ürünlerde, asidik ortamda formüle edilen sistemlerde ve düşük yağlı ya da fermente süt ürünlerinde (örneğin peynir ve yoğurt) tekstür iyileştirme amacıyla önemli avantajlar sağlamaktadır (Sipahioğlu ve ark., 1999; Koca & Metin, 2004).

Çapraz bağlı ve asetillenmiş nişastalar, yüksek sıcaklık, mekanik kesme ve asidik pH koşullarına karşı dayanıklılık göstererek ürün yapısının korunmasına katkıda bulunurken; okside ve kısmen depolimerize edilmiş nişastalar daha düşük viskozite ve yüksek jel berraklığı sunmaktadır (Singh ve ark., 2007; Zhu, 2015). Bu fonksiyonel özellikler, özellikle UHT işlemi, pastörizasyon ve dondurma-çözündürme döngülerinde ürün stabilitesinin sürdürülmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Tablo 7. Nişasta Kaynaklarına Göre Modifikasyon Gözlemleri

Tür	Kaynak	Gözlemler	Referans
Oksidasyon	Sorgum	Şişme kapasitesinde ve macun viskozitesinde azalma.	Ali ve ark., 2014
	Ticari patates	Oksidasyon sonrası macunun viskoelastik özelliklerinde azalma; mikrodalga uygulaması ile konvansiyonel yöntem arasında anlamlı fark bulunmamıştır.	Ptaszek ve ark., 2012
	Yulaf	Amilopektinin depolimerizasyonu sonucu doğrusal zincirlerde belirgin artış; yüksek sıcaklıkta viskozite azalması ve soğutma sırasında viskozitenin daha hızlı gelişmesi.	Berski ve ark., 2011
	Mısır	Yavaş sindirilebilir nişasta (SDS) miktarında azalma, dirençli nişasta (RS) miktarında artış; ancak ön jelatinize mısır nişastasında hızlı sindirilebilir nişasta (RDS) artışı gözlenmiştir.	Chung, Shin & Lim, 2008
Asit Hidrolizi	Yam	Şişme kapasitesi ve granül yoğunluğunda artış.	Falade & Ayetigbo, 2015
	Sorgum	Granüllerde parçalanma ve fragmentasyon.	Ali & Hasnain, 2014
	Bezelye nişastası (%38)	Granül yüzeyinin yüksek derecede gözenekli hale gelmesi ve buna bağlı olarak şişme kapasitesinde azalma.	Ulbrich ve ark., 2014
	Patates (%25) ve buğday (%30) nişastası	Hidroliz sonucunda granül boyutunda ve macun viskozitesinde azalma.	Singh & Ali, 2000
	Patates, mısır, buğday, bezelye ve tapiyoka nişastası (HCl, HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , H ₃ PO ₄)	Amilopektin depolimerizasyonu doğrusal zincir miktarını artırarak jel oluşumunu ve jel dayanımını desteklemiştir. H ₃ PO ₄ daha düşük hidroliz hızına sahipken, HCl ve HNO ₃ moleküler kütlede daha fazla azalma ve daha yüksek hidroliz oranına neden olmuştur.	Singh & Ali, 2000

Son yıllarda çalışmalar, yeşil kimya prensiplerine uygun, sürdürülebilir ve biyobozunur modifikasyon tekniklerine yönelmiştir. Daha düşük reaktif kullanımı, enerji verimliliği ve

Çevresel yükün azaltılması hedeflenmekte; bu yaklaşım modifiye nişastaların hem gıda hem de biyoplastik, yenilebilir film ve kontrollü salım sistemleri gibi ileri biyomalzeme uygulamalarındaki stratejik önemini artırmaktadır (Zhu, 2015). Bu çerçevede kimyasal modifikasyon tekniklerinin geleceği;  evre dostu proses tasarımı, fonksiyonel performans optimizasyonu ve uluslararası regülasyonlara uyum ekseninde şekillenmektedir.

Enzimatik Modifikasyon

Enzimatik modifikasyon, nişasta moleküllerinin yapısının spesifik enzimler aracılığıyla seçici ve kontrollü biçimde değiştirilmesine dayanmaktadır. Bu süreçte α -amilaz, glukanaz ve pullulanaz gibi enzimler kullanılarak nişasta zincirleri hidrolize edilmekte veya yeniden düzenlenmektedir. Gerçekleşen bu reaksiyonlar sonucunda jelatinizasyon ve retrogradasyon gibi temel fonksiyonel özelliklerde önemli değişimler meydana gelmektedir (Kennedy ve ark., 1988; Punia Bangar ve ark., 2022).

Enzimlerin yüksek özgüllüğü, kimyasal modifikasyon yöntemlerinde görülen rastgele glikozidik bağ parçalanmalarını ve buna bağlı istenmeyen yan ürün oluşumunu büyük ölçüde sınırlandırmaktadır. Enzimatik reaksiyonların ılımlı koşullarda gerçekleşmesi, daha düşük aktivasyon enerjisi gereksinimi sayesinde süreç verimliliğini artırmakta ve enzimlerin yeniden kullanımını mümkün kılmaktadır. Enzimlerin geri kazanımının görece kolay olması da bu yöntemin sürdürülebilirliğini desteklemektedir. Özellikle jelatinizasyon altı (sub-jelatinizasyon) koşullarda yürütülen enzimatik uygulamalar, kimyasal ve fiziksel yöntemlere  evre dostu ve tüketiciler sağlığı açısından güvenli bir alternatif olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Düşük enerji gereksinimi ve karmaşık gıda sistemlerinde yüksek substrat özgüllüğü sayesinde daha yüksek işlem verimi sağlamaktadır (Punia Bangar ve ark., 2022; Al-Maqtari ve ark., 2024).

Enzimatik modifikasyon; nişasta zincirlerinin kontrollü hidrolizi veya yeniden düzenlenmesi yoluyla zincir uzunluğu, dallanma derecesi ve moleküler dağılımın hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle kimyasal yöntemlere kıyasla daha hedefli yapısal değişiklikler sağlayarak gıda endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır (Van der Maarel ve ark., 2002; BeMiller & Whistler, 2009).

Enzimatik modifikasyon sonucunda maltodekstrinler, dekstrinler, siklodekstrinler, spesifik amiloz fraksiyonları ve dirençli nişasta bileşenleri üretilebilmektedir (Sajilata & Singhal, 2005; Miyazaki ve ark., 2006). Bu bileşenler; düşük yağlı süt ürünleri, soslar, mayonezler ve fonksiyonel gıda sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enzimle modifiye edilmiş nişastaların düşük yağlı mayonezlerde emülsiyon stabilitesini artırdığı (Mun ve ark., 2009) ve amilomaltaz ile modifiye edilen nişastaların yoğurtta kremamsı yapı sağladığı bildirilmektedir (Alting ve ark., 2009).

Genel olarak hidrolitik enzimler viskoziteyi azaltırken, debranching ve transferaz enzimleri daha düzenli ve doğrusal zincir yapıları oluşturarak jel sertliği, tekstür gelişimi ve dirençli nişasta oluşumunu artırmaktadır. Bu özellikleriyle enzimatik modifikasyon, modern nişasta teknolojisinde sürdürülebilir, hassas ve yüksek kontrol sağlayan önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Nişastanın Genetik Modifikasyonu

Nişastanın genetik modifikasyonu, nişasta biyosentezinden sorumlu bitkisel genlerin değiştirilmesi yoluyla nişasta granül yapısının ve bileşiminin doğrudan kontrol edilmesini amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu çalışmaların temeli 1930'lu yıllara kadar uzanmakta olup özellikle amiloz ve amilopektin oranlarının düzenlenmesine odaklanmaktadır. Söz konusu iki ana bileşenin

oranındaki değişiklikler; nişastanın fizikokimyasal, reolojik ve teknolojik özelliklerinde belirgin farklılıklara yol açmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen önemli bir örnek, %95–100 oranında amilopektin içeren waxy (vaksı) mısır nişastasıdır; bu ürün 1940'lı yıllarda ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır (Wurzburg, 1986; Stephen, 2006).

Biyoteknolojideki gelişmeler, nişasta üreten bitkilerin genetik düzeyde modifiye edilerek hedeflenen fonksiyonel özelliklere sahip nişastaların doğrudan bitkiden elde edilmesini mümkün kılmıştır. Mısır, patates ve pirinç gibi temel tarım ürünlerinde nişasta biyosentezinde görev alan genlerin düzenlenmesiyle; amiloz içeriği, dallanma derecesi, zincir uzunluğu dağılımı ve retrogradasyon davranışı gibi özellikler kontrol altına alınabilmektedir (Schwall ve ark., 2000; Amaraweera ve ark., 2021).

Günümüzde genetik varyasyonlar sayesinde farklı uygulama alanlarına yönelik özelleştirilmiş nişasta tipleri geliştirilebilmektedir. Waxy nişastalar ($\approx$ %100 amilopektin), hızlı pişme özellikleri, yüksek pik viskozite, soğutma sırasında stabil sol sistemleri ve düşük retrogradasyon eğilimi ile karakterize edilmektedir; bu nedenle özellikle dondurulmuş gıdalar, soslar ve depolama stabilitesi gerektiren ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna karşılık yaklaşık %25-30 oranında amiloz içeren normal mısır nişastası, soğutma sonrasında daha sert ve opak jel yapısı, orta düzey jel dayanımı ve daha düşük depolama stabilitesi göstermektedir (Tester ve ark., 2004; BeMiller & Whistler, 2009).

Genetik modifikasyon, nişastanın moleküler bileşimini doğrudan değiştirerek hedeflenen fonksiyonel özelliklerin bitki düzeyinde elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle amiloz/amilopektin oranının kontrolü; jel oluşumu, viskozite davranışı, retrogradasyon eğilimi ve sindirilebilirlik üzerinde

belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu yönüyle genetik modifikasyon, kimyasal ve enzimatik yöntemlere kıyasla daha özgül, sürdürülebilir ve ileri düzey kontrol sağlayan bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (BeMiller & Whistler, 2009).

Dual (Çiftli) Modifikasyon

Dual (çiftli) modifikasyon, nişastaya iki farklı modifikasyon yönteminin ardışık veya eş zamanlı olarak uygulanmasını ifade etmektedir. Bu yaklaşımın temel amacı, tekli modifikasyonlarla elde edilemeyen fonksiyonel özellikleri geliştirmek ve farklı yöntemler arasında sinerjik etkiler oluşturmaktır. Nişasta modifikasyon teknikleri; genetik, fiziksel, kimyasal ve enzimatik olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmakta olup bu yöntemler, nişastanın moleküler yapısı veya granül organizasyonunda kontrollü değişiklikler meydana getirerek viskozite, jel stabilitesi ve proses dayanımı gibi özelliklerin iyileştirilmesini hedeflemektedir (Singh ve ark., 2007; Sweedman ve ark., 2013). Uygun modifikasyon stratejisinin seçimi; proses koşulları, hedeflenen reolojik özellikler ve nihai ürün performansına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (BeMiller & Whistler, 2009).

Dual Modifikasyon Kombinasyonları

Dual modifikasyon uygulamaları, farklı yöntemlerin çeşitli kombinasyonlarını içermektedir. Fiziksel–kimyasal kombinasyonlar arasında yüksek basınç destekli fosforilasyon, mikrodalga destekli asetilasyon ve ultrason destekli eterifikasyon öne çıkmaktadır. Bu tür uygulamalarda fiziksel ön işlemler, kimyasal reaksiyonların etkinliğini artırmakta ve daha homojen bir modifikasyon sağlamaktadır. Kimyasal–kimyasal kombinasyonlar kapsamında ise çapraz bağlama ile asetilasyon, oksidasyon ile eterifikasyon, çapraz bağlama ile hidrokshipropilasyon ve asetilasyon ile oksidasyon gibi uygulamalar yer almaktadır. Bu kombinasyonlar özellikle yüksek sıcaklıkta işlenen, asidik

koşullarda stabilite gerektiren ve uzun raf ömrü hedeflenen ürünlerde tercih edilmektedir (Alcázar-Alay & Meireles, 2015; Ashogbon, 2021; Subroto ve ark., 2023).

Dual modifikasyonun temel amacı, nişastanın fonksiyonel özelliklerini sinerjik bir şekilde geliştirmektir. Bu doğrultuda kimyasal reaksiyonlar enzimatik sistemlerle birlikte yürütülebilmekte veya yüksek basınç, mikrodalga ve ultrason gibi fiziksel işlemlerle desteklenebilmektedir. Bu kombinasyonlar sayesinde substitüsyon derecesi (DS) artırılmakta ve türev oluşum verimi yükselmektedir (Deetae ve ark., 2008; Neelam ve ark., 2012; Ashogbon & Akintayo, 2014).

Elde edilen modifiye nişastalar; artmış asit ve ısı stabilitesi, geliştirilmiş mekanik dayanım, iyileştirilmiş donma-çözünme stabilitesi ve azalmış retrogradasyon eğilimi gibi üstün özellikler sergilemektedir. Bu iyileştirmeler, özellikle soslar, bebek mamaları, hazır çorbalar ve dondurulmuş gıdalar gibi yüksek proses dayanımı gerektiren ürünlerde önemli teknolojik avantajlar sağlamaktadır (Ashogbon & Akintayo, 2014).

Gıda Endüstrisinde Modifiye Nişasta Kullanımı

Modifiye nişastalar, gıda endüstrisinde geniş kullanım alanına sahip fonksiyonel bileşenler arasında yer almaktadır. Soslar, çorbalar, süt ürünleri, fırıncılık mamulleri ve dondurulmuş gıdalarda kıvam artırıcı, jel oluşturucu, stabilizatör ve yapı kazandırıcı olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra donma-çözünme stabilitesi sağlama, retrogradasyonu geciktirme, emülsiyon stabilizasyonu, yağ ikamesi ve yenilebilir film/kaplama materyali üretimi gibi önemli teknolojik fonksiyonlar üstlenmektedirler (Ashogbon & Akintayo, 2014; Mandal ve ark., 2020; Fatima, 2024).

Doğal nişasta, gıda formülasyonlarının temel bileşenlerinden biri olmakla birlikte; düşük mekanik dayanım,

sınırlı ısı ve asidik stabilite ile retrogradasyona yatkınlık gibi dezavantajlar nedeniyle endüstriyel proses koşullarında yetersiz kalabilmektedir. Bu sınırlılıklar, nişastanın fiziksel, kimyasal ve enzimatik yöntemlerle modifiye edilmesini gerekli kılmıştır (BeMiller, & Whistler 2009). Modifiye nişastalar; geliştirilmiş fonksiyonel özellikleri, ekonomik hammadde kaynakları olmaları ve bazı durumlarda yüksek maliyetli hidrokolloidlerin yerini alabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedir (P  rez, 2009).

Konserve   r  nler

Konserve   r  nlerde modifiye nişastalar başlıca koyulaştırıcı ve stabilizat  r olarak kullanılmaktadır. Dolum aşamasında viskoziteyi artırarak katı partik  llerin homojen bi  imde s  spansiyon halinde kalmasını sağlamakta ve sıçrama kayıplarını azaltmaktadır.   zellikle   apraz bağlı nişastalar, retort koşullarında (y  ksek sıcaklık ve basın  ) yapısal b  t  nl  klerini koruyabildikleri i  in tercih edilmektedir. Başlangı  ta y  ksek viskozite dolum verimliliğini artırırken, işlem sırasında kontroll   viskozite d  ş  ş   ısının   r  n merkezine daha etkin iletilmesine katkı sağlamaktadır (Masina ve ark., 2017).

Fırıncılık   r  nleri

Fırıncılık   r  nlerinde modifiye nişastalar; nem tutma kapasitesini artırma,   r  n yumuşaklığını koruma ve yayılmayı kontrol etme gibi işlevler   stlenmektedir.   n jelatinize nişastalar, kuru karışımlarda soğuk suda   z  nme   zellikleri sayesinde proses kolaylığı sağlamaktadır. Dekstrin ve maltodekstrin t  revleri ise film oluşturma   zellikleri ile   r  n y  zeyinde parlaklık kazandırmakta ve nem bariyeri oluşturmaktadır (Majzoobi ve ark., 2011; Park ve ark., 2018).

Dondurulmuş Ürünler

Dondurma ve dondurulmuş hazır gıdalarda modifiye nişastalar; donma-çözünme stabilitesini artırmak, sinerezi önlemek ve buz kristali oluşumunu kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Panelenmiş ürünlerde kaplamanın yüzeye tutunmasını artırırken kızartma sırasında yağ emilimini azaltmakta ve ürünün gevrek yapısını korumaktadır (Wang ve ark., 2015).

Salata Sosları ve Emülsiyon Sistemleri

Salata sosları ve benzeri emülsiyon sistemlerinde modifiye nişastalar hem koyulaştırıcı hem de emülsiyon stabilizatörü olarak görev yapmaktadır. Bu sistemler genellikle düşük pH, yüksek sıcaklık ve yüksek kesme kuvveti gibi zorlu proses koşullarına maruz kaldığından yüksek derecede çapraz bağlı nişastalar tercih edilmektedir (Maani ve ark., 2017). Düşük yağlı formülasyonlarda da ürünün yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla çapraz bağlı nişasta sistemleri ön plana çıkmaktadır (Kahraman ve ark., 2015).

Bebek Mamaları

Bebek mamalarında, özellikle retort işlemi uygulanan meyve bazlı ürünlerde, düşük pH ve yüksek sıcaklık koşullarına dayanıklılık önemli bir gerekliliktir (Vanier ve ark., 2020). Bu nedenle çapraz bağlı ve asetillenmiş waxy mısır veya tapioka nişastaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Tapioka bazlı nişastalar, nötr tat profilleri ve temiz etikve arkgısına uygunlukları nedeniyle avantaj sağlamaktadır (Woo & Seib, 2012; Mohamad Yazid, 2018).

İçecek Sistemleri

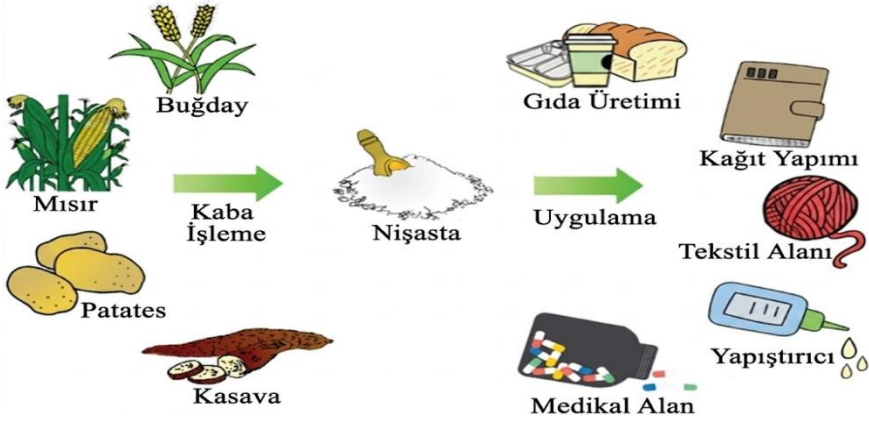
İçecek sistemlerinde modifiye nişastalar, özellikle aroma taşıyıcı yağ fazının stabilizasyonunda önemli rol oynamaktadır. Turunçgil aromalı gazlı içeceklerde faz ayrımını önlemekte, istenen bulanık görünümü sağlamakta ve emülsiyon stabilitesini artırmaktadır. Homojenizasyon sonrası oluşan ince damlacık yapısı,

ürünün fiziksel stabilitesini artırırken tüketici açısından daha dolgun bir ağız hissi oluşturmaktadır (Greer, 2018).

Gıda Dışı Endüstriyel Uygulamalar

Nişasta; biyolojik olarak parçalanabilen, yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilen, düşük maliyetli ve çevre dostu bir doğal makromoleküldür. Gıda dışı sektörlerde kullanımını mümkün kılan başlıca özellikler; su tutma kapasitesi, jelatinleşme davranışı, film oluşturma yeteneği ve adeziv (yapışma) karakteridir. Bu özellikleri sayesinde nişasta; kâğıt, tekstil, yapıştırıcı, ilaç ve biyoplastik endüstrilerinde stratejik bir hammadde olarak geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Chen ve ark., 2021a).

Şekil 5. Nişasta uygulama şeması



Kaynak: Chen ve ark., 2021a

Kâğıt ve Karton Sanayii

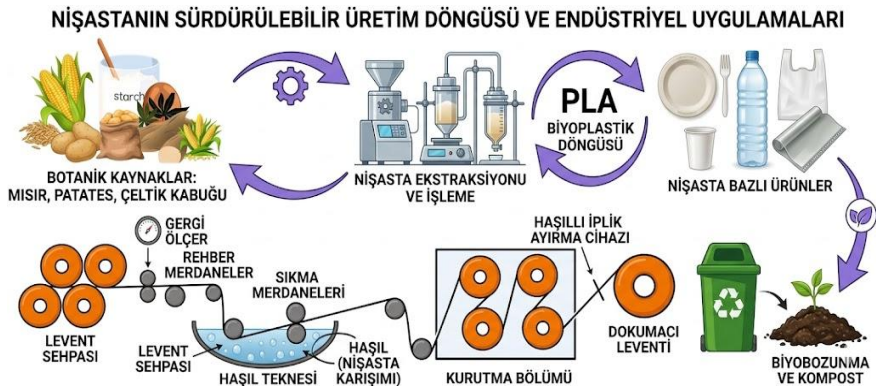
Kâğıt ve karton endüstrisi, modifiye nişastanın en geniş kullanım alanlarından birini oluşturmaktadır. Nişasta, üretim sürecinde hem hamur aşamasında (wet-end) hem de yüzey kaplama işlemlerinde (surface sizing) etkin biçimde kullanılmaktadır. Başlıca fonksiyonları; lifler arası bağlanmayı güçlendirerek mekanik dayanımı artırmak, yüzey düzgünlüğü sağlamak, baskı

kalitesini iyileştirmek, tozlanmayı azaltmak ve karton mukavemetini artırmaktır. Bu amaçla en yaygın kullanılan türevler arasında oksitlenmiş, katyonik ve çapraz bağlı nişastalar yer almaktadır. Katyonik nişasta, selüloz liflerinin negatif yüklü yüzeyleri ile elektrostatik etkileşime girerek retansiyonu ve dolgu maddesi tutulumunu artırmaktadır. Oksitlenmiş nişastalar ise düşük viskoziteleri sayesinde yüzey uygulamalarında daha homojen ve kontrollü film oluşumu sağlamaktadır (Hubbe, 2007).

Tekstil Endüstrisi

Tekstil sektörü, çevresel etkileri açısından en yoğun endüstrilerden biri olup özellikle yaş işlemler önemli çevresel yükler oluşturmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir kimyasalların kullanımı büyük önem taşımaktadır. Nişasta, tekstil endüstrisinde başlıca haşıl maddesi olarak kullanılmakta ve ipliklere mekanik dayanım kazandırarak dokuma sürecini iyileştirmektedir (Meshram ve ark., 2009; Adewale ve ark., 2022).

Şekil 6. Tekstil endüstrisinde haşılleme (sizing) işleminin şematik gösterimi



Kaynak: Gandhi, 2019, Sarkodie ve ark., 2023

Özellikle çözgü ipliklerinin haşıllanmasında, iplik yüzeyinde koruyucu bir film tabakası oluşturarak şu avantajlar sağlanmaktadır:

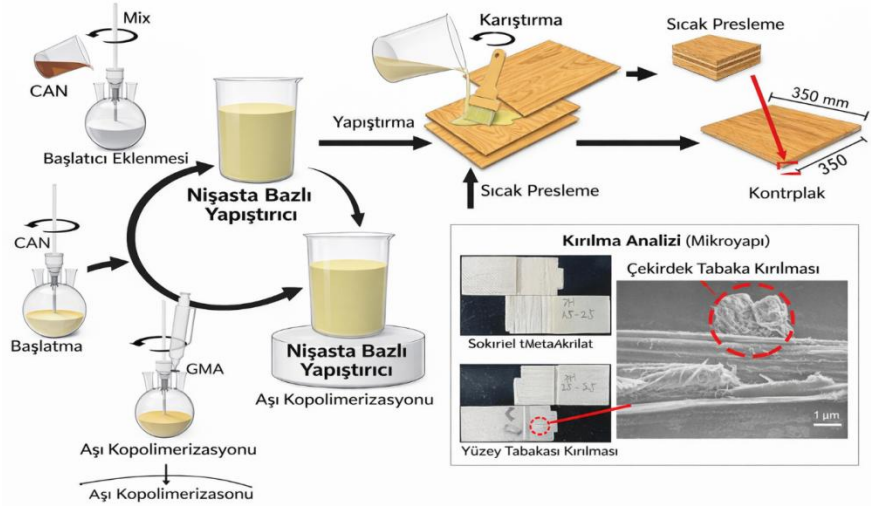
- İplik mukavemetini artırma
- Sürtünmeye karşı direnç sağlama
- İplik kopmalarını azaltarak üretim verimliliğini yükseltme (Singh ve ark., 2007)

Modifiye nişastalar, doğal nişastaya kıyasla kumaştan daha kolay uzaklaştırılabilmeleri (desizing) nedeniyle proses açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Sarkodie ve ark., 2023). Nişastanın iplik güçlendirme (haşıllama) işlemindeki teknik aşamalarını gösteren şema için (Gandhi, 2019; Sarkodie ve ark., 2023)'dan uyarlanmıştır

Yapıştırıcı Sanayii

Nişasta bazlı yapıştırıcılar, özellikle ambalaj ve kâğıt endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Başlıca kullanım alanları arasında oluklu mukavva üretimi, kâğıt torba üretimi, etiketleme sistemleri ve ahşap laminasyon uygulamaları yer almaktadır. Dekstrinler ve asit modifiye nişastalar, düşük viskozite ve hızlı yapışma özellikleri nedeniyle tercih edilirken; çapraz bağlı nişasta türevleri daha yüksek ıslak dayanım sağlamaktadır. Petrokimyasal kökenli yapıştırıcılara kıyasla nişasta bazlı sistemler; daha düşük maliyet, biyobozunur özellik ve düşük toksisite gibi avantajları sayesinde çevre dostu alternatifler olarak değerlendirilmektedir (BeMiller & Whistler, 2009; Chen ve ark., 2021b).

Şekil 7. Yapıştırıcı sanayii



Kaynak: Chen ve ark., 2021b

İlaç Endüstrisi

Farmasötik uygulamalarda nişasta, aktif farmasötik bileşenler dışında kullanılan yardımcı maddeler (eksipiyenlar) arasında önemli bir yere sahiptir. Tablet ve kapsül formülasyonlarında bağlayıcı (binder), dağıtıcı (disintegrant), dolgu maddesi (filler) ve kapsül dolgu ajanı olarak farklı fonksiyonel roller üstlenmektedir. Ön jelatinize nişastalar, doğrudan sıkıştırma (direct compression) yöntemine uygunlukları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal olarak modifiye edilmiş çapraz bağlı nişasta türevleri (örneğin sodyum nişasta glikolat) hızlı dağılma özelliği sağlayarak tabletlerin biyoyararlanımını artırmaktadır (Rowe ve ark., 2009; Kapoor, 2025). Bu durum, özellikle kontrollü salım sistemlerinde nişasta bazlı eksipiyenların önemini daha da artırmaktadır.

Şekil 8. İlaç endüstrisi



Kaynak: Kapoor, 2025

Biyobozunur Ambalajlar ve Biyopolimerler

Plastik kirliliğinin artması ve sürdürülebilir materyal arayışları, nişasta bazlı biyopolimerlere olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Termoplastik nişasta (TPS), plastikleştiriciler (örneğin gliserol) eşliğinde ısı ve mekanik enerji uygulanarak işlenebilmekte ve biyobozunur film ile ambalaj materyallerinin üretiminde kullanılmaktadır (Avérous & Halley, 2009; Gurunathan ve ark., 2025).

TPS'nin başlıca avantajları; yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, biyobozunur ve kompostlanabilir olması ve düşük karbon ayak izine sahip olmasıdır. Bununla birlikte yüksek nem duyarlılığı ve sınırlı mekanik dayanım önemli dezavantajlar arasında yer almaktadır. Bu sınırlılıkların giderilmesi amacıyla nişasta; polilaktik asit (PLA), polibütilen adipat tereftalat (PBAT) ve benzeri biyopolimerlerle harmanlanarak kompozit yapılar oluşturulmaktadır. Ayrıca nanokil ve nanoselüloz gibi nanodolgu maddeleri kullanılarak su buharı bariyer özellikleri ve mekanik dayanım önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir (Zhu, 2015).

Şekil 9. Nişasta Kaynakları ve Endüstriyel Kullanım Alanları



Kaynak: Sin & tveen 2013; Whistler ve ark. 2012

Gıda dışı sektörlerde modifiye nişastalar; bağlayıcı, film oluşturucu, stabilizatör, reoloji düzenleyici ve biyopolimer matriks bileşeni olarak çok yönlü işlevler üstlenmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, modifiye nişastaların endüstriyel önemi; fonksiyonel çeşitlilik, ekonomik avantaj ve sürdürülebilirlik olmak üzere üç temel faktöre dayanmaktadır. Yeşil kimya yaklaşımları ve nanoteknolojik gelişmeler doğrultusunda, modifiye nişastaların gelecekteki endüstriyel rolünün daha da güçleneceği öngörülmektedir (Avérous & Halley, 2009; Zhu, 2015).

Sonuç

Modifiye nişastalar, günümüzde yalnızca kıvam artırıcı bileşenler olmanın ötesine geçerek; yüksek proses toleransına sahip, fonksiyonel performansı optimize edilmiş ve hedefe yönelik tasarlanabilen yapısal bileşenler haline gelmiştir. Literatür incelendiğinde, modifikasyonun temel amacının doğal nişastanın proses koşullarından kaynaklanan sınırlılıklarını ortadan kaldırmak olduğu görülmektedir (Ashogbon & Akintayo, 2014).

Özellikle yüksek sıcaklık, düşük pH ve mekanik kesme kuvvetine maruz kalan sistemlerde doğal nişastanın yapısal stabilitesinin yetersiz kalması, çapraz bağlama ve substitüsyon gibi kimyasal modifikasyon yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Pérez, 2009). Bununla birlikte her modifikasyon yöntemi farklı fonksiyonel sonuçlar ortaya koymaktadır. Çapraz bağlama, granül içi moleküler hareketliliği sınırlayarak aşırı şişmeyi önlemekte ve viskozite stabilitesini artırmaktadır; buna karşılık oksidasyon ve asit hidrolizi, daha düşük moleküler ağırlıklı fraksiyonlar oluşturarak akışkan sistemlerde kontrollü reolojik davranış sağlamaktadır (Singh ve ark., 2007). Bu durum, modifiye nişasta seçiminde ürün bazlı bir yaklaşımın gerekliliğini ortaya koymaktadır; zira nişasta seçimi yalnızca hedeflenen fonksiyonel özelliklere değil, aynı zamanda depolama koşulları ve dağıtım zincirine de bağlıdır (Mandal ve ark., 2020).

Fonksiyonel beslenme perspektifinden değerlendirildiğinde, enzime dirençli nişastalar (özellikle RS4) hem teknolojik hem de fizyolojik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Kolonda kısa zincirli yağ asitleri üretimi ve glisemik yanıtın düzenlenmesi, bu bileşenleri fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında stratejik hale getirmektedir (Englyst ve ark., 1992; Chung ve ark., 2009). Bununla birlikte modifikasyon derecesinin artması sindirilebilirliği azaltabilmekte; aşırı modifikasyon ise bazı reolojik özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle teknolojik performans ile fizyolojik fayda arasında dengeli bir yaklaşım benimsenmelidir.

Sektörel uygulamalar incelendiğinde, modifiye nişastaların en kritik rolünün proses stabilitesi olduğu görülmektedir. Konserve ve retort sistemlerde çapraz bağlı nişastalar yapısal dayanım sağlarken (Masina ve ark., 2017), dondurulmuş ürünlerde donma-çözünme stabilitesi ve sinerez kontrolü ön plana çıkmaktadır (Wang ve ark., 2015). Emülsiyon sistemlerinde ise düşük pH

toleransı ve stabilizasyon kapasitesi belirleyici olmaktadır (Maani ve ark., 2017; Greer, 2018).

Tüketici beklentilerindeki değişim ve temiz etiket eğilimi, kimyasal modifiye nişastalara yönelik yaklaşımı etkilemiş; fiziksel ve enzimatik modifikasyon yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Termal olmayan fiziksel teknikler ve kontrollü enzimatik işlemler, sürdürülebilirlik ve etiket avantajı açısından öne çıkmaktadır (Ashogbon & Akintayo, 2014). Biyoplastikler, yenilebilir filmler ve kontrollü salım sistemleri gibi gıda dışı uygulamalar da modifiye nişastaların stratejik önemini artırmaktadır (Zhu, 2015).

Sonuç olarak, modifiye nişastaların geleceği; (i) yüksek proses toleransına sahip, hedefe yönelik fonksiyonel tasarım, (ii) beslenme ve sağlık odaklı modifikasyon yaklaşımları (özellikle dirençli nişasta fraksiyonları) ve (iii) sürdürülebilir ve temiz etiket uyumlu üretim teknolojileri olmak üzere üç temel eksen etrafında şekillenmektedir. Bu çerçevede modifiye nişastalar, yalnızca geleneksel katkı maddeleri değil; aynı zamanda yapı mühendisliği, fonksiyonel beslenme ve sürdürülebilir endüstriyel sistemlerin temel bileşenleri olarak değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Abbas, K. A., Khalil, S. K., & Hussin, A. S. M. (2010). Modified starches and their usages in selected food products: A review study. *Journal of Agricultural Science*, 2(2), 90-100. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n2p90>

Adewale, P., Yancheshmeh, M.S., & Lam, E. (2022) Starch modification for non-food, industrial applications: market intelligence and critical review. *Carbohydr Polym* 291:119590. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>

Amaraweera, S.M., Gunathilake, C., Gunawardene, O.H.P., Fernando, N.M.L., Wanninayaka, D.B., Dassanayake, R.S., Rajapaksha, S.M., Manamperi, A., Fernando, C.A.N., Kulatunga, A.K.; ve ark. (2021) Development of starch-based materials using current modification techniques and their applications: a review. *Molecules* 26(22), 6880. <https://doi.org/10.3390/molecules26226880>

Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology (Campinas)*, 35(2), 215–236. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6749>

Ali, T. M., & Hasnain, A. (2014). Morphological, physicochemical, and pasting properties of modified white sorghum (*Sorghum bicolor*) starch. *International Journal of Food Properties*, 17(3), 523-535. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.654558>

Al-Maqtari, Q.A., Li, B., He, H.J., Mahdi, A.A., Al-Ansi, W., & Saeed, A. (2024). An overview of the isolation, modification, physicochemical properties, and applications of sweet potato

starch. *Food Bioprocess Technol* 17:1–32. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03086-1>

Alting, A. C., van de Velde, F., Kanning, M. W., Burgering, M., Mulleners, L., Sein, A., & Buwalda, P. (2009). Improved creaminess of low-fat yoghurt: The impact of amylomaltase-treated starch domains. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 980-987. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.07.011>

Ashogbon, A. O., & Akintayo, E. T. (2014). Recent trend in the physical and chemical modification of starches from different botanical sources: A review. *Starch/Stärke*, 66(1-2), 41-57. <https://doi.org/10.1002/star.201300106>

Ashogbon, A. O. (2021). Dual modification of various starches: Synthesis, properties and applications. *Food Chemistry*, 342, 128325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128325>

Avérous, L., & Halley, P. J. (2009). Biocomposites based on plasticized starch. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(3), 329-343. <https://doi.org/10.1002/bbb.135>

Bashir, K., & Aggarwal, M. (2019). Physicochemical, structural and functional properties of native and irradiated starch: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 513-523. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3530-2>

BeMiller, J. N., & Whistler, R. L. (2009). *Starch: Chemistry and technology* (3rd ed.). Academic Press.

Berski, W., Ptaszek, A., Ptaszek, P., Ziobro, R., Kowalski, G., Grzesik, M., & Achremowicz, B. (2011). Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 665-671. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.036>

Bideci, Ö. (Ed.). (2022). *Mühendislik bilimlerinde güncel tartışmalar*. Duvar Yayınları.

Biliaderis, C. G. (2009). Structural transitions and related physical properties of starch. In J. N. BeMiller & R. L. Whistler (Eds.), *Starch: Chemistry and technology* (3rd ed., pp. 293-372). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00008-2>

Boahemaa, L. V., Dzandu, B., Amissah, J.G.N., Akonor, P.T., & Saalia, F.K. (2024). Physico-chemical and functional characterization of flour and starch of taro (*Colocasia esculenta*) for food applications. *Food and Humanity*, 2, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100245>

Bogaerts, A., Neyts, E. C., Gijbels, R., & van der Mullen, J. J. A. M. (2002). Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 57(4), 609-658. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00406-2)

Buléon, A., Colonna, P., Planchot, V., & Ball, S. (1998). Starch granules: Structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23, 85-112. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(98\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(98)00040-3)

Chen, X., Yao, W., Gao, F., Zheng, D., Wang, Q., Cao, J., Tan, H., & Zhang, Y. (2021a). *Physicochemical properties comparative analysis of corn starch and cassava starch, and comparative analysis as adhesive*. *Journal of Renewable Materials*, 9(5), 979–992. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014751>

Chen, X., Sun, C., Wang, Q., Tan, H., & Zhang, Y. (2021b). *Preparation of glycidyl methacrylate grafted starch adhesive to apply in high-performance and environment-friendly plywood*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 1912–1921. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.152>

Chen, X., He, X., & Huang, Q. (2014). Effects of hydrothermal pretreatment on subsequent octenylsuccinic

anhydride (OSA) modification of cornstarch. *Carbohydrate Polymers*, 101, 493-498.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.079>

Chen, Z., Zhong, H., Chen, M., Gong, F., & Li, J. (2025). The fine structure of starch: A review. *npj Science of Food*, 9, 50.
<https://doi.org/10.1038/s41538-025-00414-x>

Chung, H.-J., Liu, Q., & Hoover, R. (2009). Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. *Carbohydrate Polymers*, 75, 436-447.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.08.017>

Chung, H.-J., Shin, D.-H., & Lim, S.-T. (2008). In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Research International*, 41(5), 469-475.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.04.006>

Çağlarırnak, N., & Çakmaklı, Ü. (1993). Değişik modifiye nişastaların üretiminde kimyasal prensipler. *Gıda*, 18(2), 131-137.

Deetae, P., Shobsngob, S., Varayanond, W., Chinachoti, P., Naivikul, O., & Varavinit, S. (2008). Preparation, pasting properties and freeze-thaw stability of dual modified crosslink-phosphorylated rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 73(2), 351-358.

Ekafitri, R., Pranoto, Y., Marseno, D. W., & Sarifudin, A. (2025). Exploring novel cold plasma treatments of starch: Mechanisms, properties, and industrial applications. *Brazilian Journal of Food Technology*, 28, e13624.
<https://doi.org/10.1590/1981-6723.13624>

Elgün, A., & Ertugay, Z. (1997). *Tahıl İşleme Teknolojisi* (3. baskı). Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayın No. 297.

Eliasson, A. C. (2004). *Starch in food: Structure, function, and applications*. Woodhead Publishing Limited.

Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(Suppl 2), S33-S50. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600506>

FAO. (2023). *FAOSTAT database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat>

Falade, K. O., & Ayetigbo, O. (2015). Effects of annealing, acid hydrolysis and citric acid modifications on physical and functional properties of starches from four yam (*Dioscorea* spp.) cultivars. *Food Hydrocolloids*, 43, 529-539. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.008>

Fatima, S., Khan, M. R., Ahmad, I., & Sadiq, M. B. (2024). Recent advances in modified starch based biodegradable food packaging: A review. *Heliyon*, 10(6), e27453. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27453>

Fonseca, L. M., El Halal, S. L. M. E., Dias, A. R. G., & Zavareze, E. D. R. (2021). Physical modification of starch by heat-moisture treatment and annealing and their applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 274, 118665. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118665>

Gandhi, K. (Ed.). (2019). *Woven textiles: Principles, technologies and applications*. Woodhead Publishing.

Greer, F.R. (2018), Use of Starch and Modified Starches in Infant Feeding. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 66: S30-S34. <https://doi.org/10.1097/MPG.0000000000001828>

Gurunathan, M. K., Navasingh, R. J. H., Selvam, J. D. R., & Čep, R. (2025). Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative for packaging. *Scientific Reports*, 15, 15264. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0>

Hoover, R. (2010). The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(9), 835–847. <https://doi.org/10.1080/10408390903001735>

Hoover, R., & Ratnajoithi, N. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253-267. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00260-5](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00260-5)

Hormdok, R., & Noomhorm, A. (2007). Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality. *LWT - Food Science and Technology*, 40(10), 1723-1731. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.12.017>

Hou, X., Li, X., Li, J., Cong, J., Jiang, L., Shen, G., Chen, A., & Zhang, Z. (2023) Changes in the structural and physicochemical characteristics of sonicated potato flour. *Ultrason Sonochem* 99: 106573. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106573>

Hubbe, M. A. (2007). Paper's resistance to wetting: A review of internal sizing chemistry and effects. *BioResources*, 2(1), 106-145.

Huber, K. C., & BeMiller, J. N. (2001). Location of sites of reaction within starch granules. *Cereal Chemistry*, 78(2), 173-180. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.2.173>

Imberty, A., Buléon, A., Tran, V., & Perez, S. (1991). Recent advances in knowledge of starch structure. *Starch-Stärke*, 43(10), 375-384. <https://doi.org/10.1002/star.19910431002>

Jacobs, H., & Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular

structure: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(8), 2895-2905. <https://doi.org/10.1021/jf980169k>

Jane, J., Chen, Y. Y., Lee, L. F., McPherson, A. E., Wong, K. S., Radosavljevic, M., & Kasemsuwan, T. (1999). Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*, 76(5), 629-637. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.5.629>

Jayakody, L., & Hoover, R. (2008). Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins: A review. *Carbohydrate Polymers*, 74(3), 691-703. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.04.032>

Jyothi, A. N., Sankarakutty, S. M., & Sreekumar, J. (2010). Hydrothermal modifications of tropical tuber starches. 1. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical, rheological and gelatinization characteristics. *Starch - Stärke*, 62(1), 28-40. <https://doi.org/10.1002/star.200900191>

Kahraman, K., Köksel, H., & Ng, P. K. W. (2015). Optimisation of the reaction conditions for the production of cross-linked starch with high resistant starch content. *Food Chemistry*, 174, 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.032>

Kapoor, D. U., Pareek, A., Sharma, M., Prajapati, B. G., Suttiruengwong, S., & Sriamornsak, P. (2025). Exploring starch-based excipients in pharmaceutical formulations: Versatile applications and future perspectives. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 212, 114727. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2025.114727>

Kennedy, J.F., Cabalda, V.M., & White, C.A. (1988). Enzymic starch utilization and genetic engineering. *Trends Biotechnol*, 6, 184-189. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(88\)90044-3](https://doi.org/10.1016/0167-7799(88)90044-3)

Kent, N. L. (1970). *Technology of cereals*. Pergamon Press.

Koca, N., & Metin, M. (2004). Textural, melting and sensory properties of low-fat fresh Kashar cheese produced by using fat replacers. *International Dairy Journal*, 14(4), 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2003.08.006>

Lawal, O. S. (2004). Composition and retrogradation characteristics of modified cocoyam starch. *Food Chemistry*, 87(2), 205-218.

Li, W., Cao, F., Fan, J., Ouyang, S., Luo, Q., Zheng, J., & Zhang, G. (2014). Physically modified common buckwheat starch and their physicochemical and structural properties. *Food Hydrocolloids*, 40, 237-244.

López, O. V., Zaritzky, N. E., & García, M. A. (2010). Physicochemical characterization of chemically modified corn starches related to rheological behavior, retrogradation and film forming capacity. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.041>

Luo, Z., Fu, X., He, X., Luo, F., Gao, Q., & Yu, S. (2008). Effect of ultrasonic treatment on the physicochemical properties of maize starches differing in amylose content. *Starch/Stärke*, 60(11), 646-653. <https://doi.org/10.1002/star.200800014>

Ly, S., Gu, J., Cao, J., Tan, H., & Zhang, Y. (2015). Effect of annealing on the thermal properties of poly(lactic acid)/starch blends. *International Journal of Biological Macromolecules*, 74, 297-303. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.12.022>

Maani, B., Alimi, M., Shokoohi, S., & Fazeli, F. (2017). Substitution of modified starch with hydrogen peroxide-modified rice bran in salad dressing formulation: Physicochemical, texture, rheological and sensory properties. *Journal of Texture Studies*, 48(3), 205-214. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12241>

Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., Tongdang, T., & Mesbahi, G. (2011). Physicochemical properties of pre-gelatinized wheat starch produced by a twin drum drier. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13(2), 193-202.

Mandal, S., Mandal, A., Dey, A., & Chakrabarty, D. (2020). Tuning the swelling and rheological attributes of bentonite clay modified starch grafted polyacrylic acid based hydrogel. *Applied Clay Science*, 185, 105405. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105405>

Masina, N., Choonara, Y. E., Kumar, P., du Toit, L. C., Govender, M., Indermun, S., & Pillay, V. (2017). A review of the chemical modification techniques of starch. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1226-1236. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.094>

Meshram, M.W., Patil, V.V., Mhaske, S.T., & Thorot, B.N. (2009) Graft copolymers of starch and its application in textiles. *Carbohydr Polym* 75: 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.06.012>

Miyazaki, M., Hung, P. V., Maeda, T., & Morita, N. (2006). Recent advances in application of modified starches for breadmaking. *Trends in Food Science & Technology*, 17(11), 591-599. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.002>

Mohamad Yazid, N. S., Abdullah, N., Muhammad, N., & Matias-Peralta, H. M. (2018). Application of starch and starch-based products in food industry. *Journal of Science and Technology*, 10(2), 144-174.

Mun, S., Kim, Y.-L., Kang, C.-G., Park, K.-H., Shim, J.-Y., & Kim, Y.-R. (2009). Development of reduced-fat mayonnaise using 4 α Gase-modified rice starch and xanthan gum.

International Journal of Biological Macromolecules, 45(5), 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.02.008>

Muñoz, L. A., Pedreschi, F., Leiva, A., & Aguilera, J. M. (2015). Loss of birefringence and swelling behavior in native starch granules: Microstructural and thermal properties. *Journal of Food Engineering*, 152, 65-71.

Neelam, K., Vijay, S. K. N., & Lalit, S. (2012). Various techniques for the modification of starch and the applications of its derivatives. *International Research Journal of Pharmacy*, 3(5), 25-31. <https://doi.org/10.7897/2230-8407.03506>

Park, S. H., Na, Y., Kim, J., Kang, S. D., & Park, K. H. (2018). Properties and applications of starch modifying enzymes for use in the baking industry. *Food Science and Biotechnology*, 27, 299-312.

Pérez, S., & Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch/Stärke*, 62(8), 389-420. <https://doi.org/10.1002/star.201000013>

Pérez, S., Baldwin, P. M., & Gallant, D. J. (2009). Structural features of starch granules I. In J. N. BeMiller & R. L. Whistler (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology* (3rd ed., pp. 149-192). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00005-7>

Ptaszek, A., Łukasiewicz, M., & Bednarz, S. (2012). Environmentally friendly polysaccharide modification-Rheological properties of oxidized starch aqueous systems. *Starch/Stärke*, 64(11), 906-914. <https://doi.org/10.1002/star.201200032>

Punia Bangar, S., Ashogbon, A.O., Singh, A., Chaudhary, V., & Whiteside, W.S. (2022) Enzymatic modification of starch: a

green approach for starch applications. *Carbohydr Polym* 287: 119265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119265>

Punia Bangar, S., Sunooj, K.V., Navaf, M., & Whiteside, W.S. (2024). *Recent advancements in cross-linked starches for food applications: a review. International Journal of Food Properties*, 27(1). <https://doi.org/10.1080/10942912.2024.2318427>

Radley, J. A. (Ed.). (1968). *Starch and its derivatives* (4th ed.). Chapman & Hall.

Rashwan, A. K., Younis, H. A., Abdelshafy, A. M., Osman, A. I., Eletmany, M. R., Hafouda, M. A., & Chen, W. (2024). Plant starch extraction, modification, and green applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2483-2530. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01753-z>

Robyt, J. F. (2008). Starch: Structure, properties, chemistry, and enzymology. In B. O. Fraser-Reid, K. Tatsuta, & J. Thiem (Eds.), *Glycoscience* (pp. 1437-1472). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30429-6_35

Roudaut, G., Farhat, I., Poirier-Brulez, F., & Champion, D. (2009). Influence of water, temperature and sucrose on dynamics in glassy starch-based products studied by low-field ¹H NMR. *Carbohydrate Polymers*, 77(3), 489-495. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.01.029>

Rowe, R. C., Sheskey, P. J., & Quinn, M. E. (Eds.). (2009). *Handbook of pharmaceutical excipients* (6th ed.). Pharmaceutical Press.

Sajilata, M. G., & Singhal, R. S. (2005). Specialty starches for snack foods. *Carbohydrate Polymers*, 59(2), 131-151. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.08.012>

Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kulkarni, P. R. (2006). Resistant starch-A review. *Comprehensive Reviews in Food Science*

and *Food Safety*, 5(1), 1-17. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00076.x>

Sarkodie, B., Feng, Q., Xu, C., & Xu, Z. (2023). Desizability and biodegradability of textile warp sizing materials and their mechanism: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(8), 3317–3337. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02801-5>

Schwall, G.P., Safford, R., Westcott, R.J., Jeffcoat, R., Tayal, A., Shi, Y.C., Gidley, M.J., & Jobling, S.A. (2000) Production of very-high-amylose potato starch by inhibition of SBE A and B. *Nat Biotechnol* 18: 551–554. <https://doi.org/10.1038/75427>

Shoukat, R., Cappai, M., Pilia, L., & Pia, G. (2025). Rice starch chemistry, functional properties, and industrial applications: A review. *Polymers*, 17, 110. <https://doi.org/10.3390/polym17010110>

Sin, V. C., & Tuen, A. A. (2013). *Polylactic acid: Synthesis, properties, processing, and applications*. William Andrew.

Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: A review. *Food Hydrocolloids*, 21(2), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>

Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Gill, B. S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources: A review. *Food Chemistry*, 81(2), 219-231. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00416-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8)

Singh, V. S., & Ali, S. Z. (2000). Acid degradation of starch: The effect of acid and starch type. *Carbohydrate Polymers*, 41(2), 191–195. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(99\)00086-7](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(99)00086-7)

Sipahioglu, O., Alvarez, V. B., & Solano-López, C. (1999). Structure, physicochemical and sensory properties of feta cheese made with tapioca starch and lecithin as fat mimetics. *International Dairy Journal*, 9, 783-789. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(99\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(99)00150-8)

Siroha, A.K., Punia Bangar, S. (2026). Products Formulations from Cross-Linked Starches: An Updated Review. *Current Food Science and Technology Reports*, 4, 4. <https://doi.org/10.1007/s43555-026-00081-3>

Stephen, A. M., Phillips, G. O., & Williams, P. A. (Eds.). (2006). *Food polysaccharides and their applications* (2nd ed.). CRC Press.

Subroto, E., Cahyana, Y., Indarto, R., & Rahmah, T. A. (2023). Modification of starches and flours by acetylation and its dual modifications: A review of impact on physicochemical properties and their applications. *Polymers*, 15(14), 2990. <https://doi.org/10.3390/polym15142990>

Sweedman, M. C., Tizzotti, M. J., Schäfer, C., & Gilbert, R. G. (2013). Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 905-917. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.040>

Tester, R. F., & Debon, S. J. J. (2000). Annealing of starch: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 27(1), 1-12. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(99\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(99)00121-X)

Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch-Composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>

Tester, R. F., & Morrison, W. R. (1990). Swelling and gelatinisation of cereal starches. II. Waxy rice starches. *Cereal Chemistry*, 67(6), 558-563.

Ulbrich, M., Natan, C., & Flöter, E. (2014). Acid modification of wheat, potato, and pea starch applying gentle conditions-Impacts on starch properties. *Starch/Stärke*, 66(9-10). <https://doi.org/10.1002/star.201400089>

Van der Maarel, M. J. E. C., van der Veen, B., Uitdehaag, J. C. M., Leemhuis, H., & Dijkhuizen, L. (2002). Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family. *Journal of Biotechnology*, 94(2), 137-155. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00407-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00407-2)

Vanier, N. L., Pozzada dos Santos, J., Pinheiro Bruni, G., & Zavareze, E. R. (2020). Starches in foods and beverages. In *Handbook of eating and drinking: Interdisciplinary perspectives* (pp. 897-913).

Vamadevan, V., & Bertoft, E. (2020). Observations on the effect of amylopectin and amylose structure on starch granule swelling. *Food Hydrocolloids*, 103, 105663. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105663>

Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q., & Wang, S. (2015). Starch retrogradation: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(5), 568-585. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143>

Wang, N., Li, C., Miao, D., Hou, H., Dai, Y., Zhang, Y., & Wang, B. (2023) The effect of non-thermal physical modification on the structure, properties and chemical activity of starch: a

review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 251: 126200. <https://doi.org/10.1016/j.ijbio mac.2023.126200>

Waterschoot, J., Gomand, S. V., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2015). Starch blends and their physicochemical properties. *Starch – Stärke*, 67(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1002/star.201300214>

Whistler, R. L., BeMiller, J. N., & Paschall, E. F. (Ed.). (2012). *Starch: Chemistry and technology* (3. basım). Academic Press

Woo, K. S., & Seib, P. A. (2002). Cross-linked resistant starch: Preparation and properties. *Cereal Chemistry*, 79(6), 819-825. <https://dx.doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.6.819>

Wurzburg, O. B. (1986). Forty years of industrial starch research. *Cereal Foods World*, 31(12), 897-903.

Yadav, B. S., Guleria, P., & Yadav, R. B. (2013). Hydrothermal modification of Indian water chestnut starch: Influence of heat-moisture treatment and annealing on the physicochemical, gelatinization and pasting characteristics. *LWT - Food Science and Technology*, 53(1), 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.007>

Yalçın, E., Masatcıoğlu, M. T., & Cındık, B. (2020). Normal, waxy (mumlu) ve yüksek amilozlu nişastalar ve gıdalardaki fonksiyonel özellikleri. *GIDA- The Journal of Food*, 45(6), 1261-1271. <https://doi.org/10.15237/gida.GD20117>

Zavareze, E. R., & Dias, A. R. G. (2011). Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. *Carbohydrate Polymers*, 83(2), 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.064>

Zhao, Y., Tu, D., Wang, D., Xu, J., Zhang, W., Wu, F., & Tian, Y. (2024) Structural and property changes of starch

derivatives under microwave field: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 128465. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128465>

Zheng, Y., Qin, X., Wang, W., Chen, Z., Xie, W., Zhao, J., Zhang, R., & Li, S. (2025). Effects of high hydrostatic pressure on starch: Multi-scale structures, interactions and applications. *Food Chemistry*, 496, 146898. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146898>

Zhu, F. (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 122, 456-480. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.063>

Zhu, M., Xiong, W., Devkota, L., & Dhital, S. (2023). Ultrasound-induced changes in the structure and functionality of starch and protein. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95, 106368. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106368>

BÖLÜM 4

TEK HÜCRE PROTEİNLERİ ve GIDA SEKTÖRÜNDE KULLANIM OLANAKLARI

ALİ MÜCAHİT KARAHAN¹
OSMAN KILINÇÇEKER²

Giriş

Geleceğe yönelik nüfus tahminleri, dünya nüfusunun 2050 yılına gelindiğinde 9-10 milyar seviyesine ulaşacağını gösteriyor. Bu büyük artışın mevcut gıda ve protein üretim sistemleri üzerinde çok ciddi bir çevresel baskı yaratacağı açıkça görülmektedir (Gao ve ark. 2025; Caliskan ve ark. 2026; Dhiman ve ark. 2026). Üstelik hızlı kentleşme, orta sınıfın genişlemesi ve ekonomik kalkınma hamleleri, hayvansal kaynaklı gıdalara olan talebi de hızla artırıyor. Eğer mevcut tüketim alışkanlıklarımız bu şekilde sürmeye devam ederse, sadece et ve süt ürünleri gibi hayvansal protein kaynaklarına yönelik küresel talebin 2050'de yıllık 1,25 milyar tona ulaşacağı tahmin ediliyor (Bratosin ve ark. 2021; Abdeen ve ark. 2024; Gundupalli ve ark. 2024; Li ve ark. 2024). Bu durum, yakın gelecekte insanlığın

¹ Öğr. Gör. Dr., Adıyaman Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-8779-4349

² Prof. Dr., Adıyaman Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, Orcid: 0000-0002-5222-1775

temel beslenme ihtiyacını karşılamada çok büyük bir protein açığıyla karşı karşıya kalacağını ortaya koymaktadır (Chamodi ve ark. 2025; Yang ve ark. 2025).

Bugün yürüttüğümüz geleneksel tarım faaliyetleri ve endüstriyel hayvancılık yöntemleri, bahsettiğimiz bu protein açığını dünyanın fiziksel sınırlarını zorlamadan karşılamakta ne yazık ki yetersiz kalıyor. Hayvansal protein üretimi, yeryüzündeki tarım arazilerinin yaklaşık % 70'ini tek başına kaplamasına ve çok yüksek miktarda tatlı su tüketmesine rağmen, küresel kalori ihtiyacının sadece küçük bir bölümünü karşılayabilmekte olup, bu da besin ve enerji dönüşüm verimliliğinin ne kadar düşük olduğunu gösteren çarpıcı bir kanıttır. Çevresel boyuttan bakıldığında da hayvancılık sektörü insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının yaklaşık % 14.5-18'inden doğrudan sorumludur. Nitekim sadece bir ton sığır eti proteini elde edebilmek için doğaya 45-640 ton arasında karbondioksit eşdeğeri emisyon salındığı ve yaklaşık 1,5 milyon litre tatlı su harcandığı belirlenmiştir (Fasihi ve ark. 2025; Ayele ve ark. 2026b; Caliskan ve ark. 2026; Dhiman ve ark. 2026; Mekureyaw ve ark. 2026).

Bu sorunlara alternatif olarak sunulan soya, bezelye, buğday ve mercimek gibi geleneksel bitkisel proteinler, hayvansal kaynaklara göre daha düşük karbon ve su ayak izine sahip olsalar da endüstriyel ölçekte kendi içlerinde bazı sürdürülebilirlik engelleri barındırırlar. Küresel gıda krizini çözmek adına bitkisel tarım alanlarının genişletilmesi el değmemiş ormanların tarım arazisine dönüştürülmesine, yeraltı su kaynaklarının aşırı zorlanmasına, sentetik kimyasal gübrelerin yoğun kullanımına bağlı olarak toprak yozlaşmasına ve su kaynaklarının kirlenmesine (ötrofikasyon) neden olmaktadır (Sekoai ve ark. 2024; Fasihi ve ark. 2025). Üstelik iklim değişikliğinin beraberinde getirdiği kuraklık, aşırı sıcaklık dalgalanmaları ve düzensiz hava olayları, bitkisel ürün verimini de

doğrudan tehdit etmektedir. Genetik veya tarımsal uyum stratejilerinin zamanında devreye girmediği senaryolarda, belirli bölgelerde baklagil ve tahıl veriminin % 10-49 arasında düşebileceği öngörülmektedir (Kumar ve ark. 2023; Dhiman ve ark. 2026). Son altmış yıllık dönemde küresel tarımsal verimlilikte sadece % 10 civarında bir artış sağlanabilmiş olması, gıda üretimini topraktan, iklimden ve coğrafi kısıtlardan bağımsız hale getiren yeni modellere geçişi zorunlu kılmaktadır (Amara & El-Baky, 2023; Gao ve ark. 2025).

Bu nedenlerle, kaynakları yüksek biyolojik verimle kullanan hücresel tarım sistemleri ön plana çıkmaktadır. Literatüre ilk kez 1966 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) Carrol Wilson tarafından kazandırılan Tek Hücre Proteini (THP) kavramı ilerleyen süreçte biyoteknolojik gelişmelerin merkezine yerleşmiştir. Bakteri, maya, küf ve alglerin kullanıldığı bu yaklaşım, artık çeşitli ticari markalarla endüstriyel rüştünü ispat etmiş durumdadır (Nangul & Bhatia, 2013; Nalage ve ark. 2016; Junaid ve ark. 2020; Gao ve ark. 2025). Mikroorganizmaların biyoreaktörlerde, kontrollü fermantasyon süreçleriyle çoğaltılması esasına dayanan THP üretimi, bitkisel tarımın aylarca, büyükbaş hayvancılığın ise yıllarca süren büyüme döngülerini saatler seviyesine indirerek muazzam bir zaman avantajı sunar (Nasseri ve ark. 2011; Junaid ve ark. 2020). Geniş tarım arazilerine ihtiyaç duymayan, düşük su tüketimiyle dikey üretime imkan tanıyan ve iklimsel olumsuzluklardan etkilenmeyen bu mikrobiyal hücre fabrikaları gıda güvenliğini iklim krizinden bağımsız olarak destekleme potansiyeline sahiptir (Aidoo ve ark. 2023; Vethathirri ve ark. 2023).

THP üretimini modern gıda stratejileri açısından cazip hale getiren bir diğer unsur da döngüsel biyoekonomi ilkeleriyle olan kusursuz uyumudur. Küresel ölçekte her yıl tarım, hasat ve gıda

işleme sektörlerinden kaynaklanan yüksek miktarda organik atık çevreye bırakılmakta veya depolama alanlarında çürümeye terk edilmektedir (Salazar-López ve ark. 2022; Tropea ve ark. 2022; Asim ve ark. 2026). Tarımsal kalıntıların, odunsu (lignoselülozik) atıkların, meyve-sebze posalarının ya da peynir altı suyu gibi endüstriyel yan ürünlerin mikroorganizmalar tarafından karbon ve azot kaynağı olarak kullanılabilmesi, atık yönetimini büyük bir hammadde fırsatına dönüştürmektedir (Abdullahi ve ark. 2021; Ayele ve ark. 2026a). Ayrıca gaz fermantasyonu ve metanotrofik (karbon ve enerji kaynağı olarak yalnızca metan gazını kullanan) biyoteknolojiler sayesinde karbondioksit (CO₂), hidrojen (H₂) ve metan (CH₄) gibi endüstriyel sera gazları doğrudan mikroorganizmalarca tüketilebilmektedir (Gundupalli ve ark. 2024; Fasihi ve ark. 2025; Mohite ve ark. 2025). Bu biyoteknolojik gelişmeler sera gazlarını atmosfere karışmadan önce katma değerli mikrobiyal proteinlere dönüştürerek, düşük karbon emisyonlu gıda üretimini pratik bir gerçeğe dönüştürmektedir (Fasihi ve ark. 2025; Gao ve ark. 2025).

Beslenme güvenliğinin dünyanın sınırları dahilinde sağlanması gereken mevcut ekolojik koşullarda hücresel tarım ürünlerinin yenilikçi, güvenli ve fonksiyonel gıda formülasyonlarına dahil edilmesi stratejik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, çalışmamızın temel amacı; tek hücre proteinlerinin gıda sektöründeki kullanım olanaklarını, farklı mikrobiyal kaynakların üretim dinamiklerini, ürünlerin yapısal niteliklerini ve teknolojik hazırlık seviyelerini çok boyutlu bir analitik çerçevede incelemektir. Takip eden kısımlarda bakteri, maya, küf ve mikroalg gibi spesifik mikroorganizma gruplarının birbirlerine karşı sergiledikleri biyolojik avantaj ve dezavantajlar ele alınacaktır. Ayrıca, hücresel biyokütleden elde edilen proteinlerin gıda matrisleri içerisindeki emülsifikasyon, jelleşme, köpürme ve su tutma kapasitesi gibi kritik

teknolojik-fonksiyonel özellikleri değerlendirilerek modern gıda endüstrisindeki uygulama potansiyelleri kapsamlı bir şekilde ortaya konulacaktır.

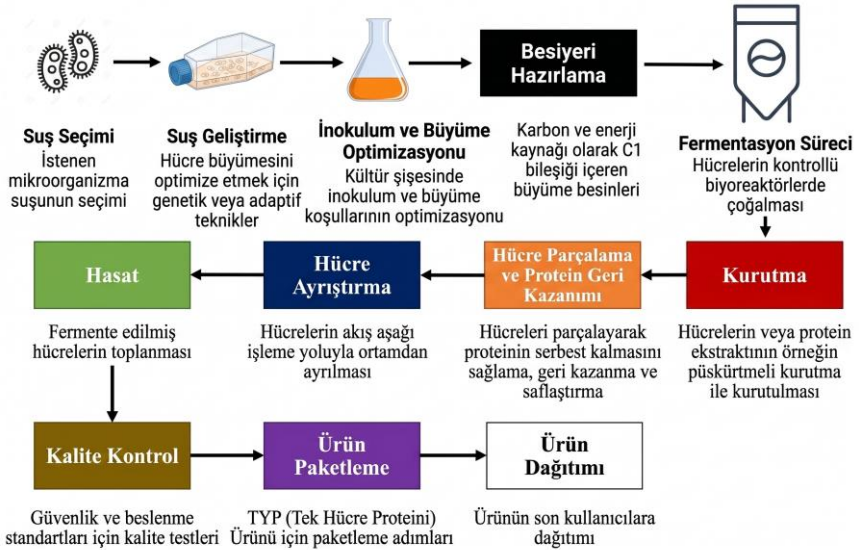
Tek Hücre Proteini (THP): Tanımı ve Biyolojik Kaynakları

Bilimsel ve endüstriyel literatürde Tek Hücre Proteini (THP); bakteri, maya, küf (ipliksi mantar) ve mikroalg ya da siyanobakteri gibi tek veya çok hücreli mikroskobik canlıların sıvı altı veya katı hal fermantasyonu yöntemleriyle, tamamen kontrollü ortamlarda çoğaltılmasıyla elde edilen protein yönünden zengin, kurutulmuş hücresel kütleyi ifade eder. Aynı zamanda, çeşitli saflaştırma ve geri kazanım adımlarıyla hücre zarlarından ayrıştırılmış saf protein özütleri de bu kapsamda değerlendirilmektedir (Anupama & Ravindra, 2000; Raziq ve ark. 2020; Abdullahi ve ark. 2021; Chamodi ve ark. 2025). Gıda ve yem sektöründe alternatif bir temel besin kaynağı olarak görülen tek hücre proteinlerinin üretimi mikrobiyoloji, biyoteknoloji ve proses mühendisliği adımlarını bir araya getiren entegre bir süreçtir. Fabrika ölçeğinde yüksek verim, standart kalite ve tüketim güvenliği kriterlerini yakalayabilmek için bu üretim hattının her aşaması titizlikle planlanan bir dizi operasyona dayanır.

Ticari bir tek hücre proteini üretiminin ilk adımdan son ürüne kadar olan yolculuğu öncelikle amaca ve hammaddeye en uygun mikroorganizma türlerinin seçilmesi ve laboratuvar ortamında geliştirilmesiyle başlar (Gundupalli ve ark., 2024). Ardından, tarımsal atıklar ya da endüstriyel yan ürünler kullanılarak mikroorganizmaların büyüyeceği besi ortamı hazırlanıp sterilize edilir ve seçilen suşlar bu ortama aşılanır (Aidoo ve ark., 2023; Ayele ve ark., 2026a). Biyoreaktör adı verilen gelişmiş tanklarda asitlik, sıcaklık, karıştırma ve oksijen gibi kritik koşulların tam istendiği gibi dengelendiği fermantasyon sürecinde, bu minik canlılar hızla

çoğalarak protein açısından zengin bir biyokütle oluştururlar (Gundupalli ve ark., 2024; Ayele ve ark., 2026a). Üretim tamamlandığında, oluşan bu yoğun kütle santrifüj veya süzme gibi yöntemlerle sıvı ortamdan ayrılıp hasat edilir (Thiviya ve ark., 2022; Aidoo ve ark., 2023). Biyokütle hasat edildikten sonra, hücrelerin sert çeperleri proteinin dışarı çıkmasını ve insan vücudunda daha kolay sindirilmesini sağlamak amacıyla ultrason, yüksek basınç veya özel enzimler yardımıyla parçalanır (Thiviya ve ark., 2022; Gundupalli ve ark., 2024). Tam bu aşamada, hücreden ayrılan ve insan sağlığı için kronik risk oluşturabilecek yüksek nükleik asit (RNA/DNA) miktarı da ısıtma veya enzimatik yöntemlerle güvenli seviyelere indirilir. Elde edilen saf protein özütü püskürtmeli kurutma (spray drying) veya dondurarak kurutma gibi yöntemlerle nemden arındırılarak dayanıklı bir toz haline getirilir (Aidoo ve ark., 2023; Gundupalli ve ark., 2024). Son olarak bu protein tozu besin değeri ve tüketim güvenliği açısından sıkı kalite kontrol testlerine tabi tutulur, gıda formülasyonlarında kullanılmak üzere paketlenir ve dağıtıma hazır hale getirilir (Thiviya ve ark., 2022; Gundupalli ve ark., 2024). Tüm bu endüstriyel üretim sürecinin temel akış şeması ve operasyonel basamakları Şekil 1’de genel hatlarıyla özetlenmiştir.

Şekil 1. Tek Hücre Proteini (THP) Endüstriyel Üretim Sürecinin Temel Akış Şeması



Kaynak: Gundupalli ve ark. 2024

Canlı sınıflandırmasında farklı gruplara mensup olan bu mikroorganizmalar kalıtsal genetik altyapıları, evrimsel metabolik yolları, hücre duvarı yapıları, büyüme hızları ve farklı besin kaynaklarına gösterdikleri besinsel eğilimleri bakımından kesin çizgilerle ayrılırlar. Biyolojik kaynaklar arasındaki bu yapısal çeşitlilik üretilen mikrobiyal proteinin kimyasal bileşimini, esansiyel amino asit dizilimini, besin değerini, toksikolojik güvenlik profilini ve nihai gıda uygulamalarındaki fizikokimyasal davranışını doğrudan belirleyen temel faktördür (Alves ve ark. 2025; Ayele ve ark. 2026a). Takip eden Tablo 1'de farklı mikroorganizmalardan elde edilen biyokütlelerin ortalama protein, yağ, nükleik asit ve kül gibi makrobesin bileşimleri özetlenmiştir.

Tablo 1. Farklı Mikrobiyal Biyokütle Kaynaklarının Ortalama Makrobesin Bileşimi (Kuru Ağırlık %)

Mikroorganizma Grubu	Protein	Yağ	Nükleik Asit	Kül
Bakteriler	50–83	1–10	8–16	3–7
Mayalar	40–60	2–6	6–12	5–10
Küfler (İpliksi Mantarlar)	30–70	2–13	7–10	9–14
Mikroalgler ve Siyanobakteriler	40–70	7–20	3–8	8–10

Not: Hücresel kuru ağırlığın geri kalan fraksiyonunu başta duvar polisakkaritleri (beta-glukan, mannan, kitin vb.) olmak üzere yapısal karbohidratlar oluşturmaktadır.

Kaynak: Nasser ve ark. 2011; Demirel & Şentürk-Demirel, 2018; Kumar ve ark. 2023

Bakteriler

Bakteriler tek hücre proteini üretiminde en yüksek protein verimine sahip mikroorganizma gruplarının başında gelir. Hücrelerinin kuru ağırlığına bakıldığında, türüne göre % 50-80 gibi oldukça yüksek bir oranda protein içerebilirler (Gundupalli ve ark., 2024). Bu canlıların en belirgin özelliği inanılmaz derecede hızlı çoğalmalarıdır. Ortamdaki besin ve sıcaklık gibi koşullar uygun olduğunda, sadece 20-120 dakika gibi kısa bir süre içinde (Tablo 2) kendi sayılarını ikiye katlayabilirler (Sharif ve ark., 2021).

Üretimde amaca ve eldeki atık kaynağına göre farklı bakteri türleri tercih edilir. Örneğin, doğalgazın ana bileşeni olan metan veya metanol gibi gazları kullanarak büyüyen *Methylococcus capsulatus* ve *Methylophilus methylotrophus* gibi türler ticari

üretimde en çok bilinenlerdendir. Buna ek olarak, *Methylomonas methanica*, *Methylocapsa acidiphila* ve çeşitli *Methylobacterium* türleri de gazları yüksek verimle proteine çevirmede oldukça başarılıdır (Gundupalli ve ark., 2024). Karbondioksit ve hidrojeni kullanarak gelişen *Cupriavidus necator* da yine gazları hammadde olarak kullanan önemli bir diğer türdür.

Bakteriler sadece gazları değil, tarımsal ve endüstriyel atıkları da tüketmede çok uzadır. Özellikle nişasta, meyve kabukları veya peynir altı suyu gibi organik atıkları hızla parçalayarak proteine dönüştüren *Bacillus* ailesi bu alanda oldukça yaygındır. *Bacillus subtilis*'in yanı sıra *Bacillus cereus*, *Bacillus pumilis* ve patates atıklarını çok iyi değerlendiren *Bacillus licheniformis* tek hücre proteini eldesinde sıkça kullanılır (Bratosin ve ark., 2021). Tarımsal atıkların değerlendirilmesinde ayrıca *Cellulomonas*, *Corynebacterium glutamicum* ve *Lactobacillus* gibi bakteriler de öne çıkar. Bunların yanında, enerjisini güneşten alan ve atık suları temizlerken eş zamanlı olarak yüksek kaliteli protein üreten fotosentetik mor sülfürsüz bakteriler de vardır. Bu grupta *Rhodopseudomonas palustris* ve *Rhodobacter sphaeroides* en çok dikkat çeken türlerdendir (Bratosin ve ark., 2021). Hatta petrokimya atık suları gibi zorlu ve aşırı tuzlu ortamlarda bile yaşayıp yüksek oranda protein üretebilen *Haloarcula* gibi dayanıklı bakteriler dahi bu süreçte değerlendirilmektedir (Raziq ve ark., 2020).

Bakterilerden elde edilen bu proteinlerin besin değeri oldukça yüksektir. Bitkisel protein kaynaklarında, örneğin tahıllarda, genellikle eksik olan metiyonin gibi kükürtlü amino asitler bakımından zengindirler ve kaliteli balık unu veya soya proteini ile rahatça boy ölçüşebilirler (Gundupalli ve ark., 2024).

Tek hücre proteini üretiminde bakteri kullanımında bazı kritik zorluklarla karşılaşilmektedir. Bakteriler yapısal olarak çok

küçük boyutlarda oldukları için, üretim süreci tamamlandığında onları içinde bulundukları sıvı ortamdan süzüp ayırmak ve hasat etmek oldukça zor, yüksek maliyetli santrifüj ya da filtrasyon sistemleri gerektirir (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018). Bunun yanı sıra, çok hızlı çoğalmalarının biyolojik bir yan etkisi olarak hücrelerinde yüksek oranda nükleik asit (DNA ve RNA) biriktirirler. Fazla nükleik asit tüketimi insanlarda ürik asit birikimine bağlı olarak gut hastalığı veya böbrek taşı gibi ciddi rahatsızlıklara yol açabileceği için, bu proteinlerin gıda olarak tüketime sunulmadan önce bazı özel işlemlerden geçirilerek nükleik asitlerden arındırılması şarttır (Ayele ve ark., 2026a). Bazı bakteri türlerinin endüstriyel süreçlerde zararlı toksik maddeler üretme riski taşıması ve toplumdaki genel "hastalık yapıcı bakteri" algısı, bu ürünlerin doğrudan insan gıdası olarak ticari boyut kazanmasını ve tüketici tarafından kabul edilmesini kısıtlamaktadır (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018).

Mayalar

Mayalar yüzyıllardır ekmek, şarap ve peynir gibi geleneksel gıdaların üretiminde yer aldıkları için toplumda en çok güvenilen ve endüstride en yüksek kabul gören mikroorganizmalardır (Alves ve ark., 2025).

Tek hücre proteini üretiminde mayaları cazip kılan en önemli özelliklerden biri düşük ve asidik pH seviyelerinde rahatça büyüebilmeleridir (Tablo 2). Bu asidik ortam üretim sırasında dışarıdan zararlı bakterilerin sisteme bulaşma riskini doğal yollarla engeller ve son derece masraflı olan katı sterilizasyon işlemlerine duyulan ihtiyacı azaltır (Bratosin ve ark., 2021). Buna ek olarak mayaların 5-10 µm'ye ulaşan iri hücre boyutları, üretim süreci tamamlandığında sıvı ortamdan basit süzme veya düşük devirli santrifüj yöntemleriyle, bakterilere kıyasla çok daha ucuza ve

kolayca toplanmalarına olanak sağlar (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018).

Besin değerleri açısından değerlendirildiğinde, mayaların kuru ağırlıklarının yaklaşık % 40-60'ı proteinden oluşur (Thiviya ve ark., 2022). Tiamin, riboflavin, niasin, biyotin ve folik asit gibi B kompleksi vitaminleri yönünden son derece zengin birer biyolojik fabrikadırlar (Bratosin ve ark., 2021). Amino asit dizilimlerinde, bitkisel proteinlerde genellikle yetersiz olan lizin amino asidi bol miktarda bulunur. Ancak bakterilerle kıyaslandıklarında metiyonin ve sistein gibi kükürt içeren amino asitleri daha düşük oranda barındırırlar (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018). Bu yapısal eksiği kapatmak için maya proteinleri gıda formülasyonlarına eklenirken genellikle kükürtlü amino asitlerce zengin başka kaynaklarla harmanlanır veya bu amino asitleri üretebilen özel maya türleri seçilir.

Üretimde en çok bilinen ve Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından "Genel Olarak Güvenli" (GRAS) statüsünde kabul edilen temel tür, fırıncı veya bira mayası olarak bilinen *Saccharomyces cerevisiae*'dir (Alves ve ark., 2025). Bununla birlikte, çok geniş yelpazedeki tarımsal ve endüstriyel atıkları sindirebilen *Candida* ailesi de üretimin omurgalarından biridir. Endüstride "Torula mayası" adıyla anılan ve lezzet artırıcı olarak gıdalara katılan *Candida utilis* (yeni taksonomik adıyla *Cyberlindnera jadinii*), bu grubun en popüler üyesidir (Amara & El-Baky, 2023). Şeker kamışı posası, narenciye posası ve kahve işleme atıkları gibi materyalleri proteine çevirmede *Candida tropicalis*, *Candida lipolytica*, *Candida krusei*, *Candida intermedia*, *Candida novellas*, *Candida parapsilosis*, *Candida glabrata* ve *Candida sorboxylosa* gibi türler yaygın olarak kullanılır (Raziq ve ark., 2020; Koukoumaki ve ark., 2024a).

Peynir üretiminden arta kalan oldukça fazla miktardaki peynir altı suyunu (whey) değerlendirme konusunda laktoz şekerini çok iyi parçalayan *Kluyveromyces* türleri tercih edilir. Bu alanda *Kluyveromyces marxianus*, *Kluyveromyces lactis* ve *Kluyveromyces fragilis* en başarılı mayalardır. Özellikle *K. marxianus* ve *K. fragilis* mayalarda genelde eksik olan kükürtlü amino asitleri sentezleyebilme yetenekleriyle öne çıkarlar (Raziq ve ark., 2020; Amara & El-Baky, 2023). Eğer üretim tesisinde atık yağlar, gliserol veya hidrofobik karbon kaynakları işlenecekse, yağı seven (oleajinöz) mayalar devreye girer. *Yarrowia lipolytica*, *Lipomyces starkeyi*, *Trichosporon* ile *Cryptococcus aureus* ve *Cryptococcus curvatus* gibi türler bu zorlu atıklardan yüksek verimle protein elde edilmesini sağlarlar (Onyeaka ve ark., 2022).

Endüstriyel üretimde sadece atıkları temizlemekle kalmayıp aynı zamanda değerli antioksidan pigmentler üreten *Rhodotorula mucilaginosa* ve *Rhodotorula glutinis* gibi pembe-kırmızı renkli mayalar da tek hücre proteini endüstrisinde ilgi görmektedir (Koukoumaki ve ark., 2024a). Doğalgaz veya biyogaz türevi metanol gibi tek karbonlu bileşikleri doğrudan besin olarak kullanabilen metilotrofik mayalar da mevcuttur. Bu yetenekleriyle öne çıkan *Pichia pastoris* ve *Pichia jadinii*, geniş tarım arazilerine ihtiyaç duymadan yüksek yoğunluklu hücre üretebilen ticari potansiyeli yüksek organizmalardır (Amara & El-Baky, 2023; Alves ve ark., 2025). Deniz sularına veya çok tuzlu ortamlara toleranslı olan *Debaryomyces hansenii*, protein üretiminin yanı sıra taşıdığı güçlü probiyotik özellikler sayesinde hayvan beslemesinde hastalıklara karşı koruyucu bir ajan olarak kullanılır (Bratosin ve ark., 2021). Bozulmuş meyvelerden, hurma pekmezi atıklarından ve gıda posalarından başarıyla izole edilerek üretim sistemlerine dahil edilen *Hanseniaspora uvarum*, *Hanseniaspora guilliermondii*, *Zygosaccharomyces rouxii*, *Geotrichum candidum*, *Meyerozyma*

caribbica, *Wickerhamomyces anomalus*, *Issatchenkia orientalis* ve *Cyberlindnera fabianii* gibi çok çeşitli maya suşları da hem protein verimleri hem de oluşturdıkları aroma profilleriyle gıda endüstrisinde umut vadetmektedir (Onyeaka ve ark., 2022; Aidoo ve ark., 2023; Koukoumaki ve ark., 2024a).

Mayaların üretiminde ve tüketiminde karşılaşılan temel zorlukların başında, hücre zarlarını çevreleyen ve glukan ile mannoprotein gibi karmaşık polisakkaritlerden oluşan kalın, sert hücre duvarları gelmektedir. İnsan ve tek mideli hayvanların sindirim sistemi enzimleri bu inatçı çeper yapısını tek başına parçalayamadığı için hücresel proteinlerin emilimi engellenir. Bu nedenle tüketim öncesinde hücrelerin ultrasonik mekanik parçalama, yüksek basınç veya enzimatik yöntemlerle mutlaka kırılması gerekir (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018). Ayrıca hücre yapılarında biriken nükleik asit (özellikle RNA) miktarı bakteriler kadar aşırı boyutlarda olmasa da, insanlarda ürik asit dengesini bozarak gut rahatsızlığı tetikleme riskine karşı endüstriyel boyutta hücresel yıkım operasyonlarıyla güvenli sınırların altına çekilmek zorundadır (Bratosin ve ark., 2021; Demirel & Şentürk-Demirel, 2018).

Küfler

Tek hücre proteini üretiminde "küfler" ya da bilimsel adıyla ipliksi (filamentöz) mantarlar, çok güçlü birer biyolojik geri dönüşüm fabrikası gibi çalışırlar. En belirgin özellikleri, dışarıya salgıladıkları güçlü enzimler sayesinde ağaç talaşından meyve kabuklarına, samanlardan tarımsal posalara kadar sindirimi çok zor olan atıkları kolayca parçalayıp kendi besinlerine dönüştürebilmeleridir (Ayele ve ark., 2026b; Dhiman ve ark., 2026). Bakterilerle kıyaslandıklarında daha yavaş büyürler ve içerdikleri protein oranı genellikle % 30-50 civarındadır (Tablo 2). Ancak ipliksi, ağ benzeri yapılarından dolayı üretim bittiginde sıvı

ortamdan pahalı cihazlara gerek kalmadan, basit bir süzme işlemiyle toplanabilirler. Bu da üretim maliyetlerini ciddi oranda düşürür (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018; Alves ve ark., 2025).

Üretimde kullanılan küf çeşitlerinden özellikle et ikamesi ürünlerde lifli yapısı nedeniyle *Fusarium* ailesi başı çeker. Bu grupta en çok bilinen, dünya çapında ticari olarak satılan et alternatiflerinde kullanılan *Fusarium venenatum*'dur. Bunun yanında *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium solani*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium semitectum* ve *Fusarium flavolapis* türleri de sıklıkla değerlendirilir (Khan ve ark., 2024; Yu ve ark., 2026). Uzak Doğu'nun geleneksel gıdalarının üretimde kullanılan ve protein üretiminde çok başarılı olan *Neurospora* ailesinden *Neurospora intermedia*, *Neurospora sitophila* ve *Neurospora crassa* öne çıkar. Benzer şekilde *Rhizopus* cinsine ait *Rhizopus oryzae*, *Rhizopus oligosporus*, *Rhizopus arrhizus*, *Rhizopus microsporus* ve *Rhizopus chinensis* küfleri de atıkları proteine çevirmede oldukça yaygın kullanılan güvenilir türlerdir (Raziq ve ark., 2020; Amara & El-Baky, 2023).

Tarımsal atıkları çok hızlı parçalayan diğer önemli gruplar ise *Aspergillus*, *Penicillium* ve *Trichoderma* aileleridir. *Aspergillus* grubundan *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus terreus*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus* ve *Aspergillus ochraceus* en çok çalışılan türlerdir. *Penicillium* ailesinde ise *Penicillium citrinum*, *Penicillium crustosum*, *Penicillium roqueforti*, *Penicillium camemberti*, *Penicillium cyclopium*, *Penicillium janthinellum* ve *Penicillium chermesinum* gibi çok çeşitli küflerin atıklardan protein ürettiği görülmektedir (Ahmed ve ark., 2025; Dhiman ve ark., 2026). İnatçı selülozu parçalamakta usta olan *Trichoderma* grubundan ise *Trichoderma reesei*, *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma viride*, *Trichoderma koningii* ve *Trichoderma album* türleri tercih edilir. Bu geniş listenin dışında

Mucor indicus, *Paecilomyces variotii*, *Chaetomium cellulolyticum*, *Chrysonilia sitophila* ve *Scytalidium acidophilum* gibi özel türler de farklı sanayi atıklarını proteine dönüştürmede başarıyla kullanılmaktadır (Raziq ve ark., 2020; Amara & El-Baky, 2023).

Küflerden elde edilen bu proteinler B vitamini açısından oldukça zengindir ve insan beslenmesinde değerli olan lizin gibi amino asitleri bolca barındırır. Sadece metiyonin gibi kükürtlü amino asitler açısından biraz yetersizdirler (Nangul & Bhatia, 2013).

Küflerle gerçekleştirilen protein üretim proseslerinde karşılaşılan en büyük risk ve zorluk biyolojik güvenliktir. Başta *Aspergillus* ve *Fusarium* olmak üzere, bu ailelerin doğada serbest halde bulunan bazı yabancı suşları, insan ve hayvan sağlığını akut veya kronik düzeyde tehdit eden aflatoksin ya da benzeri mikotoksinleri salgılaya potansiyeline sahiptir (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018). Bu durum, gıda veya yem üretimi aşamasında kesinlikle toksin üretmediği genetik ve laboratuvar analizleriyle kanıtlanmış izole suşların kullanılmasını zorunluluk haline getirmektedir. Bir diğer operasyonel zorluk ise, küflerin ipliksi (filamentöz) büyüme karakterinden dolayı biyoreaktör ortamındaki sıvıyı aşırı koyu ve yapışkan (yüksek viskoziteli) bir kıvama getirmesidir. Bu viskozite artışı kütle transferini ve sisteme verilen oksijenin homojen dağılımını zorlaştırarak pratik endüstriyel üretimi zorlaştırmaktadır (Alves ve ark., 2025).

Mikroalgler ve Siyanobakteriler

Mikroalgler ve siyanobakteriler (mavi-yeşil algler), fotosentez yaparak güneş enerjisini ve karbondioksiti yüksek kaliteli proteine dönüştüren çevre dostu canlılardır (Tablo 2). Geniş tarım arazilerine ihtiyaç duymadan, hatta atık sularda bile yetiştirilebilen bu organizmaların kuru ağırlıklarının % 40-70'i proteinden oluşur (Chamodi ve ark., 2025). Diğer protein kaynaklarıyla

kıyaslandıklarında sadece protein açısından değil omega-3 ve omega-6 gibi faydalı yağ asitleri, B12 ve A vitamini ile çeşitli mineraller yönünden de son derece zengindirler. Bu canlıları bakteri ve mayalardan ayıran en büyük özellikleri, insan sağlığı için risk oluşturabilen nükleik asit oranının tüm mikroorganizmalar arasında en düşük seviyede (%3-8) olmasıdır. Bu nedenle doğrudan tüketim için oldukça güvenlidirler (Nalage ve ark., 2016).

Mavi-yeşil algler olarak bilinen siyanobakteriler, tek hücre proteini pazarının en popüler ve ticari açıdan en başarılı üyelerini barındırır. Bu grubun en çok bilineni, besin takviyesi olarak dünya çapında yaygın bir şekilde tüketilen *Spirulina* (bilimsel adlarıyla *Arthrospira platensis* ve *Arthrospira maxima*) türleridir (Alves ve ark., 2025). *Spirulina*, sert bir selülozik hücre duvarına sahip olmadığı için insan sindirim sisteminde kolayca parçalanır ve fazladan mekanik bir işleme gerek kalmadan yüksek oranda emilir (Alves ve ark., 2025). Bu grupta tek hücre proteini ve gıda takviyesi olarak güvenle kullanılan diğer önemli siyanobakteriler arasında *Aphanizomenon flos-aquae*, *Nostoc* sp. ve *Synechococcus* sp. yer almaktadır (Onyeaka ve ark., 2022; Li ve ark., 2024).

Yeşil mikroalgler de protein üretimi için çok çeşitli seçenekler sunar. Özellikle *Chlorella* ailesinden *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella sorokiniana* ve *Chlorella luteoviridis* yüksek protein oranlarıyla öne çıkarlar, ancak hücre duvarları çok sert olduğu için proteinlerinin sindirilebilmesi adına tüketim öncesinde hücrelerinin özel işlemlerle parçalanması gerekir (Li ve ark., 2024; Atubukha ve ark., 2026). Aynı grupta yer alan *Scenedesmus obliquus* ve *Scenedesmus acutus* ile denizel bir tür olan *Tetraselmis chuii* de besin değeri yüksek, dayanıklı alglerdir. Üretim tuzlu ortamlarda yapılacaksa, hücre duvarı bulunmayan ve bu sayede sindirimi çok kolay olan *Dunaliella salina* oldukça verimli bir alternatiftir (Janssen ve ark., 2022).

Bu temel türlerin dışında, sadece protein üretmekle kalmayıp aynı zamanda değerli antioksidanlar ve fonksiyonel yağlar sentezleyen özel mikroalgler de sıklıkla yetiştirilmektedir. Örneğin, kırmızımsı renkli *Haematococcus phuvialis* güçlü bir antioksidan olan astaksantin üretiminde kullanılırken, *Phaeodactylum tricornutum* ve *Odontella aurita* esansiyel yağ asitleri açısından çok zengindir (Onyeaka ve ark., 2022; Atubukha ve ark., 2026). Aşırı asidik ve sıcak ortamlarda bile yaşayabilen dayanıklı *Galdieria sulphuraria*, gıda endüstrisinde kıvam artırıcı olarak değerlendirilen *Euglena gracilis* ve *Caulerpa racemosa* gibi türler de tek hücre proteini eldesinde başarıyla kullanılmaktadır (Janssen ve ark., 2022; Onyeaka ve ark., 2022).

Mikroalg ve siyanobakteri kökenli tek hücre proteini üretimindeki en belirgin zorluk, kitle üretiminin açık havuz sistemlerinde (raceway ponds) yapılması durumunda ortamın dışarıdan gelebilecek yabancı istilacı türlere ve çevre kirliliğine açık hale gelmesidir. Bu durumun önüne geçmek için kapalı fotobiyoreaktörler kullanılsa da, bu sistemlerin ilk kurulum ve işletim maliyetleri oldukça yüksektir (Chamodi ve ark., 2025). Tüketim aşamasındaki en temel engellerden biri ise, özellikle *Chlorella* gibi yeşil mikroalglerin taşıdığı mikroskobik ölçekteki selülozik hücre çeperlerinin son derece dirençli olmasıdır. Bu yapı mekanik veya kimyasal yöntemlerle parçalanmadığı takdirde hücre içi proteinlerin sindirilebilirliği son derece düşük kalmaktadır (Atubukha ve ark., 2026). Ayrıca son ürünlerin koyu yeşil-mavi renkleri ve kendilerine has baskın deniz/balık kokuları nedeniyle, gıda sanayisinde formülasyonlara eklenirken koku giderme veya renk maskeleye gibi ek işlemlerin yapılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Nalage ve ark., 2016).

Tablo 2. THP Üretiminde Kullanılan Mikroorganizma Gruplarının Karşılaştırılması

Takson	Üretim Dinamikleri	Teknolojik Avantajları	Operasyonel Dezavantajları
Bakteriler	% 50-83 protein 20-120 dk'da bir çoğalma	En yüksek verim kabiliyeti; C1 gazlarını ve atıkları asimile edebilme	Yüksek nükleik asit (% 8-16); küçük hücre boyutu nedeniyle zor/pahalı hasat
Mayalar	% 40-60 protein 1-3 saatte bir çoğalma	GRAS statüsü; iri hücre (5-10 µm) ile kolay hasat; asidik pH koruması	Bakterilere kıyasla yavaş büyüme; kükürtlü amino asitlerde eksiklik
Küfler	% 30-70 protein Miselyal büyüme	İpliksi yapı ile çok ucuz süzme; odunsu atıkları doğrudan parçalama	Sıvı reolojisinde yüksek viskozite; ölümcül mikotoksin sentezleme riski
Mikroalgler	% 40-70 protein 2-6 saatte bir çoğalma	Temiz fotosentetik üretim; en düşük nükleik asit; Omega-3 ve pigment zenginliği	Düşük yoğunluklu havuz ihtiyacı; inatçı selülozik duvar kırma maliyeti

Kaynak: Nasseri ve ark. 2011; Demirel & Şentürk-Demirel, 2018;; Sharif ve ark. 2021; Alves ve ark. 2025

Tek Hücre Proteinlerinin Fonksiyonel ve Reolojik Özellikleri

Yeni bir gıda maddesi geliştirirken ya da mevcut ürünlerin yapısını tasarlarken, kullanılan bileşenlerin teknolojik özellikleri çok büyük bir önem taşır. Proteinlerin bu fonksiyonel davranışları; çözünürlük, emülsiyon (yağ-su karışımı) oluşturma, jel yapısı kurma, köpürme kapasitesi ile su ve yağ tutma kabiliyetlerini kapsar (Atubukha ve ark., 2026). Bu özellikler temelde proteinin kendi

moleküler yapısı ve amino asit dizilimi tarafından belirlense de, üretim ve işleme sırasında uygulanan sıcaklık, ortamın asitlik (pH) değeri, proteinin elektriksel olarak yüksüz ve en az çözünür olduğu nokta (izoelektrik nokta) ve uygulanan özütleme (ekstraksiyon) yöntemleri gibi çevresel faktörlerden de doğrudan etkilenir (Ayele ve ark., 2026a; Caliskan ve ark., 2026). Amino asit zincirindeki su seven (hidrofilik) veya yağ seven (hidrofobik) bölgelerin dağılımı ile çözünürlüğün asitliğe bağlı olarak değişmesi, proteinlerin birbiriyle karışmayan sıvıları kararlı bir yapıda tutma ya da ısı yardımıyla sağlam ağlar kurma yeteneğini doğrudan belirler.

Gıda sektöründe proteinlerin bu yapısal özellikleri fırıncılık ürünlerinde hacim ve gözenekli yapı sağlamak, et alternatiflerinde et dokusunu ve çiğnenebilirliği taklit etmek, içeceklerde pürüzsüz bir ağız hissi yaratmak ve sosis ya da mayonez gibi ürünlerde yağ-su ayrılmasını engellemek gibi çok önemli faydalar sunar (Atubukha ve ark., 2026; Yu ve ark., 2026). Bu sayede gıdaların hem kalitesi ve raf ömrü uzar hem de tüketiciler tarafından beğenilme ve kabul görme oranı artar. Sahip oldukları yüksek besin değerinin yanı sıra gıda ortamlarında sergiledikleri bu çeşitli teknolojik yetenekler tek hücre proteinlerini (THP) geleneksel bitkisel ve hayvansal proteinlere karşı son derece güçlü bir alternatif haline getirmektedir (Ayele ve ark., 2026a).

Ancak THP'lerin gıda içindeki bu performansları elde edildikleri mikroorganizmanın (bakteri, maya, mikroalg veya ipliksi mantar) hücre duvarı yapılarına ve fermantasyon koşullarına göre ciddi farklılıklar gösterir (Ayele ve ark., 2026a; Luecha ve ark., 2026). Örneğin, ipliksi mantarlardan elde edilen mikoproteinler yapılarında doğal olarak bulunan kitin, kitosan ve beta-glukan gibi lifli bileşenler sayesinde yüksek su ve yağ bağlama, güçlü emülsiyon oluşturma ve esnek ağ yapıları kurma yeteneğine sahiptir. Bu lifli yapıları sayesinde kırmızı etin dokusunu çok başarılı bir şekilde

taklit edebildiklerinden, bitki/mantar bazlı et alternatiflerinde öncelikli olarak tercih edilirler (Chen ve ark., 2026; Hashempour-Baltork ve ark., 2023; Khan ve ark., 2024; Santhapur ve ark., 2024). Diğer yandan, mikroalg ve bakterilerden elde edilen THP'ler genellikle çok yüksek bir protein çözünürlüğüne ve güçlü emülsiyon kapasitesine sahip olsalar da tek başlarına jel oluşturma güçleri daha zayıf kalabilmektedir. Bu nedenle, gıda formülasyonlarında istenen o sıkı ve çığnenabilir dokuyu yakalayabilmek için patates proteini veya karragenan gibi doğal jelleştiricilerin desteğine ya da ultrason gibi ısıl olmayan bazı modern işleme tekniklerine ihtiyaç duyabilirler (Hashempour-Baltork ve ark., 2023; Atubukha ve ark., 2026; Caliskan ve ark., 2026; Yu ve ark., 2026).

Protein Çözünürlüğü ve Çevresel Faktörlerin Etkisi

Protein çözünürlüğü bir gıda bileşeninin içecekler, sıvı çorbalar veya kremsi soslar gibi sulu gıda sistemlerine pürüzsüz ve homojen bir şekilde karışabilmesi için en temel kriterdir. Bir proteinin çözünürlüğü emülsiyon ve köpük oluşturma gibi yüzey aktif diğer teknolojik özelliklerini sergileyebilmesi açısından da kritik bir role sahiptir. Proteinin bu çözünürlük yapısı içinde bulunduğu sıvı ortamın asitlik (pH) değerine, sıcaklığına ve ortamdaki tuz (iyonik güç) dengesine doğrudan bağlı olarak değişiklik gösterir (Koukoumaki ve ark. 2024a).

Yeni nesil gaz fermantasyonu yöntemiyle, hidrojen okside eden ototrofik bir bakteri türü kullanılarak üretilen ticari tek hücre proteini (Solein) üzerine yapılan detaylı yapısal analizler bu konuda çarpıcı sonuçlar ortaya koymuştur. Bu mikrobiyal protein pH=7 yani nötr bir ortamda % 41.41 gibi oldukça yüksek bir çözünürlük oranına ulaşmıştır. Bu değer günümüzde bitki bazlı ürünlerde endüstri standardı olarak kabul edilen ticari bezelye proteini izolatının (%)

22.36) sergilediği çözünürlük performansını neredeyse ikiye katlamaktadır (Caliskan ve ark. 2026).

Proteinlerin suda rahatça çözünmesini sağlayan temel unsur, molekülün dış yüzeyindeki su seven (hidrofilik) kısımların su molekülleriyle güçlü bağlar kurabilmesidir. Ancak üretim veya işleme sırasında uygulanan sert hücre parçalama (homojenizasyon) ya da püskürterek kurutma (spray drying) gibi aşırı ısı ve mekanik işlemler proteinin doğal yapısının bozulmasına (denatürasyona) yol açabilir. Bu bozulma sonucunda, protein molekülünün iç kısımlarında saklı olan yağ seven (hidrofobik) bölgeler açığa çıkarak yüzeye tırmanır. Bu durum proteinin çözünürlüğünü çok ciddi oranda düşürerek gıda içinde toplanıp çökmesine neden olur (Caliskan ve ark. 2026). Diğer yandan, fermantasyon sürecinde uygulanan özel enzimlerle uzun protein zincirlerinin kontrollü bir şekilde daha küçük ve esnek parçalara (peptitlere) bölünmesi çözünürlük oranında % 15-20 arasında çok net bir artış sağlayabilmektedir (Ayele ve ark. 2026a).

Su Tutma ve Yağ Bağlama Kapasiteleri

Mikrobiyal proteinlerin (tek hücre proteinlerinin) su tutma ve yağ bağlama kapasitesi, bu proteinlerin ortamdaki serbest suyu veya sıvı yağı kendi üç boyutlu ağ yapısı içinde fiziksel bağlarla (kapiler ve hidrojen bağları) hapsedebilme yeteneğini gösterir. Bu iki özellik sosis ve burger gibi ısıtılmış işlem gören et ürünlerinde, unlu mamullerde ve yoğurt gibi gıdalarda nemin korunması, ağızda bırakılan doku hissinin iyileştirilmesi ve raf ömrü boyunca meydana gelebilecek su salmanın (sinerezis) önlenmesi açısından kritik rol oynar (Kaur & Chavan, 2022).

Yapılan araştırmalar üretimde kullanılan ham madde ve mikroorganizma türünün bu özellikleri doğrudan etkilediğini göstermektedir. Örneğin, tarımsal meyve ve sebze atıklarının karbon

kaynağı olarak kullanıldığı bir ortamda *Lactobacillus sp.* ile üretilen tek hücre proteininin su tutma kapasitesi 2.31 mL/g, yağ bağlama kapasitesi ise 1.89 mL/g olarak ölçülmüştür. Bu değerler, ticari buğday ununun bağlama değerlerinden belirgin şekilde daha yüksektir (Kaur & Chavan, 2022). Farklı mikroorganizma türlerinin su ve yağ ile etkileşime girme eğilimleri yapısal olarak değişebilir. Nitekim gaz fermantasyonu yöntemiyle üretilen bakteriyel protein izolatlarının yağ tutma kapasitesi (% 71.61), yağa olan yüksek ilgisi nedeniyle ticari bezelye proteininden (% 35.23) neredeyse iki kat daha yüksek bulunmuştur. Buna karşın aynı mikrobiyal proteinin su tutma kapasitesi (% 147,79), suya karşı güçlü bir eğilimi olan bezelye proteininin (% 300,04) gerisinde kalmıştır (Caliskan ve ark., 2026).

Mikrobiyal proteinlerin gıdalarda sergilediği bu sıvı tutma performansları, sadece saf protein zincirinin yapısından kaynaklanmaz. Bu durum, biyokütle içinde yer alan beta-glukan, mannan, pektin benzeri moleküller ve peptidoglikanlar gibi kompleks hücre duvarı şekerlerinin suya eğilimli (hidrofilik) karakterleriyle proteinlerin ortaklaşa (sinerjistik) bir etkileşime girmesi sonucunda daha da güçlenmektedir (Tian ve ark., 2023; Ayele ve ark., 2026a).

Emülsifikasyon ve Köpürme Dinamikleri

Emülsiyon kapasitesi ve faz stabilitesi su ve yağ gibi normalde birbiriyle karışmayan ve kısa sürede ayrışmaya eğilimli iki sıvının, proteinlerin yardımıyla ne kadar süre bir arada kararlı kalabildiğini ifade eder. Protein molekülleri, hem suyu hem de yağı seven çift yönlü yapıları sayesinde su ile yağın birleştiği sınır çizgisine yerleşir. Suyun içindeki yağ damlacıklarının etrafını bir kalkan gibi sararak, bu damlacıkların birbirine çarpıp büyümesini ve yağın üste çıkmasını engeller (Kaur & Chavan, 2022).

Yapılan dayanıklılık testleri, *Xanthobacter sp.* bakterisinden elde edilen proteinlerin, mekanik zorlamalara karşı çok dirençli ve uzun ömürlü emülsiyonlar oluşturduğunu kanıtlamıştır. Bu mikrobiyal protein dakikada sadece % 0.05 gibi çok düşük bir ayrışma hızı gösterirken, bezelye proteini (% 0.29/dakika) çok daha hızlı bir şekilde yağ ve su olarak ayrışmaktadır (Caliskan ve ark., 2026). Yüksek yağ tutma gücü ve protein zincirlerinin esnekliği sayesinde tek hücre proteinleri mayonez, kremalı salata sosları, bitkisel sütler ve dondurma gibi gıdalarda mükemmel bir kıvam koruyucu ve bağlayıcı olarak kullanılabilir. Örneğin, geleneksel kefirde elde edilen maya ve bakteri kültürleriyle üretilen proteinlerin emülsiyon başarısı et sektöründe standart olarak kullanılan yağsız soya ununun performansı ile birebir aynı seviyede bulunmuştur (Koukoumaki ve ark., 2024a).

Proteinlerin köpürme özelliği ise karıştırma esnasında havayla suyun buluştuğu yüzeye hızla yayılması ve hava kabarcıklarının etrafını esnek, kopmayan bir tabakayla sarması mantığına dayanır (Kaur & Chavan, 2022). Özellikle fırıncılık ürünleri için çok önemli olan bu özellik incelendiğinde, *Lactobacillus* kökenli meyve atıklarından üretilen tek hücre proteininin % 12.25 köpürme kapasitesi ve % 19.25 köpük kalıcılığı sağladığı görülmüştür (Kaur & Chavan, 2022). Diğer yandan, hidrojen kullanan bakterilerden elde edilen proteinlerin ilk başta bezelye proteinine kıyasla daha az köpük yaptığı, ancak oluşan köpüğün zamanla sönmeye karşı direncinin bezelye proteiniyle benzer şekilde yüksek ve dayanıklı olduğu belirlenmiştir (Caliskan ve ark., 2026).

Jelleşme, Reolojik Davranışlar ve Viskozite Modifikasyonu

Jelleşme yeteneği ve kıvam değiştirme özellikleri sıvı haldeki proteinlerin ısı, pH değişimi veya enzimler yardımıyla kendi

aralarında güçlü bağlar kurması sürecidir. Bu süreçte proteinler, üç boyutlu ve birbirine bağlı sıkı bir ağ yapısı oluşturarak ortamdaki serbest suyu bu yapının içine hapseder (Luecha ve ark., 2026). Gıda endüstrisinde özellikle ipliksi mantarlardan (*Fusarium venenatum*) elde edilen tek hücre proteinleri incelendiğinde, bu proteinlerin normal bağlara ek olarak kendi doğal hücre yapılarındaki mikroskobik liflerin fiziksel olarak birbirine dolanması sayesinde, ürüne yapı ve doku kazandıran güçlü bir karakter gösterdiği bilinmektedir (Ayele ve ark., 2026a).

Bakteri kökenli tek hücre proteinlerinin asit etkisiyle jelleşme davranışları incelendiğinde ise protein oranının bu yapıda ne kadar belirleyici olduğu görülmektedir. Yapılan akışkanlık (reoloji) çalışmalarında, % 3.5 gibi düşük yoğunluktaki bakteri proteini karışımlarının inek sütü (kazein) ve soya proteinlerine kıyasla daha iri gözenekli ve zayıf bir jel yapısı oluşturduğu, bu yüzden de suyu dışarı sızdırmaya (sinerezis) eğilimli olduğu gözlemlenmiştir (Luecha ve ark., 2026). Ayrıca süt ve soya yapılarında ortam sıcaklığının (20 °C veya 40 °C) jelin oluşma hızı üzerinde doğrudan bir etkisi varken, düşük yoğunluktaki tek hücre proteini karışımlarında sıcaklık değişimlerinin belirgin bir etkisi saptanmamıştır (Luecha ve ark., 2026).

Buna karşın, tek hücre proteini miktarı % 6.2 ve % 9 gibi daha yüksek seviyelere çıkarıldığında jelleşme davranışı tamamen değişmektedir. Bu yüksek yoğunlukta, bakteri proteini karışımı asitliğin başladığı ilk anlardan itibaren güçlü bir katılaşma eğilimi göstererek ürünün toplam kıvamını doğrudan belirler. Parçacık miktarının yüksek olduğu bu sistemlerde, malzemenin şeklini koruma gücü (elastikiyeti), akışkanlık özelliğini reaksiyonun hemen başında geride bırakır. Böylece malzeme, sıvı halden hem esnek hem de katı özellikler gösteren dengeli bir jel yapısına hızla geçiş yapar (Luecha ve ark., 2026).

Termal Stabilite ve Partikül Boyutu Karakteristikleri

Termal stabilite (ısıya karşı kararlılık) gıda bileşenlerinin fırınlama, ekstrüzyon (yüksek basınç ve sıcaklıkta pişirme) ve pastörizasyon gibi endüstriyel işlemler sırasında yapısal bütünlüğünü, fiziksel özelliklerini ve besin değerlerini koruyabilme yeteneğidir (Gao ve ark., 2025; Atubukha ve ark., 2026). Gıda endüstrisinde bu durum son derece önemlidir. Çünkü yüksek sıcaklıklar yağların acılaşmasını (lipid oksidasyonu) hızlandırabildiği gibi, protein yapısını bozarak amino asitlerin vücuttaki yararlılığını ve gıdanın dokusal kalitesini doğrudan olumsuz etkileyebilir (Gao ve ark., 2025). Tek hücre proteinlerinin (THP) ısıya karşı kararlılık durumları incelendiğinde, bu mikrobiyal proteinlerin ısıl şoklara karşı yüksek tolerans gösterdiği ve geleneksel proteinlerden farklı bir direnç mekanizmasına sahip olduğu görülmektedir (Gao ve ark., 2025; Atubukha ve ark., 2026).

Partikül boyutu ise gıda formülasyonlarına toz veya sıvı karışım olarak eklenen bileşenlerin su alma hızını, protein çözünürlüğünü, emülsiyon kararlılığını ve sindirim enzimleri ile olan etkileşimini doğrudan belirleyen kritik bir parametredir (Gao ve ark., 2025; Atubukha ve ark., 2026). Hücre izolasyonunun ardından yüksek basınçlı homojenizasyon ve sprey kurutma işlemlerinden geçirilerek elde edilen bakteriyel THP kuru tozu, yaklaşık 45.5 µm civarında bir ortalama çapa sahiptir (Luecha ve ark., 2026). Bu değer; sektörde standart kabul edilen ticari soya protein izolatu parçacıklarından (160 µm) ve sprey kurutulmuş yağsız süt tozundan (229 µm) çok daha küçük ve homojendir (Luecha ve ark., 2026).

Normal şartlarda ortalama partikül boyutunun küçük olması, toplam yüzey alanını artırdığı için sulu gıda sistemlerinde parçacıkların birbiriyle etkileşimini tetikler ve karıştırma işlemleri

sırasında kıvam artışına yol açabilir (Atubukha ve ark., 2026). Ancak, üretim süreçlerindeki sert mekanik hücre parçalama ve kurutma işlemlerinden kaynaklanan yüzeydeki yapısal bozulmalar ile girintiler, proteinin suyla ve enzimlerle etkileşime girebileceği aktif alanları daraltabilmektedir. Bu durum da proteinin sindirilebilirliğini ve çözünürlük verimini kısıtlayıcı bir etki yapabilmektedir (Gao ve ark., 2025; Atubukha ve ark., 2026).

Bununla birlikte, toz veya süspansiyon olarak eklenen THP parçacıklarının boyutu ve ısıl işlemlere verdikleri yapısal (reolojik) tepkiler, son ürünün kalitesini doğrudan etkiler (Luecha ve ark., 2026). Sulu karışımlar yüksek ısıl işleme tabi tutulduğunda normal süt proteinlerinde peynir altı suyu ile kazein arasındaki ısıya bağlı etkileşimler yüzünden topaklaşma ve parça boyutu büyümesi meydana gelir. Bakteriyel THP süspansiyonları ise 90°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında bile bu tarz bir bozulma veya topaklaşma göstermemiştir (Atubukha ve ark., 2026; Luecha ve ark., 2026). Bu direnç, fabrika hatlarındaki borularda tıkanmalara yol açabilecek ani kıvam artışlarını önleyerek, üretim mühendisliği açısından büyük bir avantaj sağlamıştır.

İşleme kolaylığı sağlayan bir diğer önemli faktör ise, hücresel THP'nin amino asit profili kaynaklı olarak, standart süt ve soya proteinlerine kıyasla sıvı içinde asitliği dengeleme (tamponlama) kapasitesinin daha düşük olmasıdır (Caliskan ve ark., 2026; Luecha ve ark., 2026). Bu özellik, bu proteinlerin vegan yoğurt veya fermente bitkisel süt üretim hatlarında kullanıldığında ortamdaki pH'ın asitliğe doğru hızla düşmesini sağlamaktadır. Böylece mayalanma sürecini zamansal olarak hızlandırmakta, üretim sürelerini kısaltmakta ve işletme genelindeki spesifik enerji maliyetlerini düşürmektedir (Caliskan ve ark., 2026; Luecha ve ark., 2026).

Gıda Sektöründe THP Kullanımının Sağlık ve Beslenme Açısından Avantajları

HücreSEL tarım teknolojilerinin endüstriyel ölçeKte ulaştığı bugünkü seviye, elde edilen mikrobiyal kaynakların modern gıda formülasyonlarında sadece alternatif bir besin deposu olarak değil, aynı zamanda çok yönlü işlevsel bir bileşen olarak görülmesini sağlamıştır (Onyeaka ve ark., 2022; Alves ve ark., 2025). Geleneksel bitkisel ve hayvansal kaynaklara kıyasla tamamen farklı bir hücre yapısına sahip olan tek hücre proteinleri içerdikleri özel aktif maddeler, amino asit dizilimleri ve bağışıklık sistemini düzenleyici hücre duvarı şekerleri sayesinde insan sağlığı üzerinde iyileştirici (terapötik) etkiler yaratma potansiyeline sahiptir (Baş ve ark., 2021; Ayele ve ark., 2026a). Küresel beslenme güvenliğinin sağlanmasında çok önemli bir yere sahip olan bu mikrobiyal kaynakların ticari ürünlere dahil edilmesi sürecinde ise bazı hassas dengelerin gözetilmesi gerekir. Bu süreçte en kritik nokta proteinlerin vücut tarafından ne kadar iyi kullanıldığını gösteren sindirilebilirlik oranları ile hücre içindeki nükleik asit miktarından kaynaklanabilecek uzun vadeli sağlık riskleri arasındaki dengenin doğru yönetilmesidir (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018; Ayele ve ark., 2026a; Caliskan ve ark., 2026).

Biyoaktif Özellikler ve Terapötik Potansiyel

Mikroorganizmalar doğadaki zorlu çevre koşullarında hayatta kalabilmek için kendilerini koruyan çeşitli savunma mekanizmaları geliştirirler. Bu uyum süreçlerinin bir sonucu olarak da insan sağlığına büyük faydalar sağlayan değerli ve aktif bileşikler üretirler (Baş ve ark. 2021; Ayele ve ark. 2026a). Son yıllarda yapılan araştırmalar, mikroorganizmaların bu doğal potansiyelinden

sağlık destek ürünlerinde nasıl yararlanabileceğimizi açıkça ortaya koymaktadır.

Bu canlıların en dikkat çekici örneklerinden biri, yüksek oranda klorofil içeren zengin bir protein kaynağı olan *Chlorella vulgaris* adlı yeşil mikroalglerdir. Laboratuvar çalışmalarında, bu alglere uygulanan özel bir enzim işlemi sayesinde çok değerli protein parçacıkları elde edilmiştir. Bu parçacıkların, tansiyonu dengeleyen mekanizmalarda rol oynayarak damar sağlığını koruduğu, hücreleri yıpratıcı oksijen hasarına karşı güçlü bir antioksidan kalkan oluşturduğu ve kansere karşı koruyucu özellikler taşıdığı kanıtlanmıştır (Baş ve ark. 2021). Benzer şekilde, bir diğer fotosentetik canlı olan *Spirulina* hücreleri de adeta birer antioksidan deposudur. *Spirulina* fikosiyanın, astaksantin, lutein ve beta-karoten gibi yüksek miktarda renkli pigment biriktirir. Bu doğal bileşikler, vücuttaki zararlı serbest radikal moleküllerini yakalayıp etkisiz hale getirerek hücresel yaşlanmayı geciktirir ve vücuttaki iç iltihaplanmayı azaltmaya yardımcı olur (Ayele ve ark. 2026a).

Mikroorganizmaların sadece içlerindeki maddeler değil, onları çevreleyen dış hücre duvarları da sağlığımız için oldukça faydalıdır (Alves ve ark. 2025). Maya ve ipliksi mantarların hücre duvarına sağlamlık veren beta-glukan ve mannan kökenli lifli yapılar midemizdeki sindirim enzimlerine karşı direnç gösterir. Sindirilmeden kalın bağırsağa kadar ulaşan bu yapılar, buradaki yararlı bakterileri besleyen birer diyet lifi, yani prebiyotik görevi görerek bağırsak florasını zenginleştirirler.

Maya hücre duvarından elde edilen bu özel liflerin faydaları sadece bağırsak florasını beslemekle kalmaz, aynı zamanda bağırsak yüzeyindeki bağışıklık hücrelerini uyararak vücudun savunma sistemini de harekete geçirir. Özellikle *Saccharomyces cerevisiae* (ekmek mayası) ve *Candida utilis* (Torula mayası) gibi maya

türlerini içeren takviyelerin bağırsak duvarını mekanik bir kalkan gibi koruduğu bilinmektedir. Bu takviyeler, bağırsak dokusunun bütünlüğünü destekler, zararlı mikropların vücuda sızmasını engeller ve enfeksiyon riskini belirgin şekilde düşürerek genel direnci artırır (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018; Ayele ve ark. 2026a).

Protein Kalitesi ve Sindirilebilirlik İndeksleri

Protein kalitesi, bir besinin vücudumuzun tamir ve yapım işleri için gerekli olan yapıtaşlarını ne derece karşılayabildiğini gösteren temel bir ölçüttür. Bu değer proteinin içindeki amino asitlerin çeşitliliği ve dengesiyle belirlenir (Ayele ve ark., 2026a; Caliskan ve ark., 2026). Vücudumuzun kendi kendine üretemediği ve dışarıdan yiyeceklerle almak zorunda olduğumuz lizin, metiyonin, treonin gibi esansiyel (zorunlu) amino asitlerin miktarı, o proteinin besin değerini doğrudan etkiler (Ayele ve ark., 2026a).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) gibi kuruluşlar, protein kalitesini ölçmek için “Protein Sindirilebilirliği Düzeltilmiş Amino Asit Skoru” (PDCAAS) ve “Sindirilebilir Esansiyel (Zorunlu) Amino Asit Skoru” (DIAAS) adı verilen uluslararası skorlama sistemlerini kullanırlar (Caliskan ve ark., 2026). Ancak bir proteinin amino asit içeriği ne kadar kusursuz olursa olsun, mide ve bağırsakta sindirim enzimleri tarafından parçalanıp kana karışamazsa, yani biyoyararlanımı düşükse besleyici değeri yetersiz kalır. Bu yüzden sindirilebilirlik protein kalitesini belirleyen en kritik faktördür (Ayele ve ark., 2026a; Caliskan ve ark., 2026).

Geleceğin besinleri olarak görülen tek hücre proteinlerinde (THP) ise sindirilebilirlik durumu, mikroorganizmanın türüne göre ciddi farklılıklar gösterir (Ayele ve ark., 2026a; Caliskan ve ark., 2026). Bu canlıların sindirim sistemimizde ne kadar emilebileceğini

belirleyen en önemli unsur, dışlarında bulunan koruyucu hücre duvarının yapısıdır (Ayele ve ark. 2026a). Özellikle bazı mikroalgler, mantarlar ve mayalar sindirim enzimlerinin içteki proteine ulaşmasını engelleyen kalın ve sert bir hücre duvarına sahiptir (Janssen ve ark., 2022; Aidoo ve ark., 2023; Alves ve ark., 2025).

Örneğin, mikroskobik bir alg olan *Chlorella* türlerinin çok katmanlı ve selüloz liflerinden oluşan sert çeperi sindirimi zorlaştırdığı için, endüstriyel üretimde bu duvarı mekanik olarak kırma veya enzimlerle parçalama gibi ön işlemler zorunlu hale gelir (Ayele ve ark. 2026a). Buna karşın, *Spirulina* gibi ince ve kolay çözünen bir dış zara sahip olan canlılar, herhangi bir ön işleme gerek kalmadan sindirim kanalında hızla parçalanır ve yüksek kaliteli besin elementlerini doğrudan vücuda sunar (Ayele ve ark. 2026a). Bu nedenle, hücre duvarı sert olan mikrobiyal biyokütleleri tüketmeden önce ultrason dalgaları, yüksek basınç veya kırma gibi yöntemlerle bu yapısal engelleri aşmak, proteinin vücutundaki emilimini artırmak için şarttır (Alves ve ark., 2025; Caliskan ve ark., 2026).

Biyoteknolojik yöntemlerle elde edilen bu yeni nesil proteinlerin değeri sadece toplam protein miktarından ziyade içerdiği esansiyel amino asitlerin dengesiyle ölçülür (Baş ve ark. 2021). Doğru yöntemlerle işlenen tek hücre proteinleri mısır veya buğday gibi geleneksel bitkisel kaynaklara kıyasla uluslararası standartlara çok daha uygun ve dengeli bir amino asit profili sunar (Baş ve ark. 2021). Yapılan laboratuvar ortamındaki yapay sindirim testleri, gaz fermentasyonu ile üretilen bakteriyel proteinlerin, vücutun kas yapımı için ihtiyaç duyduğu amino asit kalitesi bakımından ticari bezelye proteinlerini bile geride bıraktığını göstermiştir (Caliskan ve ark. 2026). Maya kökenli proteinler de bitkisel protein izolatlarıyla yarışacak seviyede olsa da, mayaların

doğal yapısından kaynaklanan kükürtlü amino asit (metiyonin ve sistein) eksikliği, bu ürünler tek başına tüketildiğinde, toplam kalite skorunu biraz kısıtlamaktadır (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018). Son olarak, çok hızlı çoğalan bu mikroorganizmalarda doğal olarak yüksek oranda bulunan nükleik asitlerin (DNA ve RNA) tüketim güvenliğini sağlamak ve protein kalitesini en üst noktaya taşımak için ısıtma veya enzimatik işlemlerle azaltılması da üretim sürecinin zorunlu bir parçasıdır (Ayele ve ark., 2026a; Caliskan ve ark., 2026).

Nükleik Asit Riskleri ve İndirgeme Proseslerinin Besinsel Kaliteye Etkisi

Mikroorganizmalar, endüstriyel üretim tanklarında en hızlı büyüdükleri dönemde hücre içinde yoğun miktarda RNA ve DNA sentezlerler. Bu hızlı çoğalma nedeniyle, elde edilen mikrobiyal biyokütledeki toplam nükleik asit oranı hücre kuru ağırlığının % 15-16'sı gibi çok yüksek seviyelere ulaşır (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018). Ancak insan karaciğeri ve böbreği vücutta yıkılan bu nükleik asit parçalarını (purin bazlarını) zararsız bir şekilde idrarla atılabilen "allantoin" formuna dönüştürecek özel bir enzime (ürikaz enzimi) genetik olarak sahip değildir (Gundupalli ve ark. 2024). Bu nedenle, günde 2 gramın üzerinde nükleik asit içeren tek hücre proteini tüketmek insan sağlığı için risk oluşturur. Bu sınır aşıldığında kandaki ürik asit seviyesi aniden yükselir, bu asidik maddeler eklemlerde birikerek ağrılı gut hastalığına ve böbrek kanallarında taş oluşumuna yol açar. İşte bu yüzden uluslararası gıda otoriteleri bu proteinlerin gıdalara güvenle eklenebilmesi için nükleik asit oranının kesin olarak % 2'nin altına düşürülmesini şart koşmaktadır (Demirel & Şentürk-Demirel, 2018; Ayele ve ark. 2026a).

Biyoproses mühendisleri bu yasal ve hayati sınırı yakalayabilmek için çeşitli saflaştırma yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu yöntemlerin başında, hücrelerin 60-70°C arasında ani

sıcaklıklara maruz bırakıldığı ısı şok uygulamaları, ortamın asitlik/bazlık dengesini (pH) değiştiren kimyasal yıkama adımları ve nükleik asitleri parçalayan özel "RNase" enzimi takviyeleri gelmektedir (Gervasi ve ark. 2018; Ayele ve ark. 2026a). Ancak tüketici güvenliğini sağlamak için uygulanan bu işlemler, elde edilmek istenen asıl proteinin yapısı ve gıdalardaki işlevselliği üzerinde ciddi yan etkiler yaratma riski taşıır (Caliskan ve ark. 2026).

Örneğin, hücre içindeki RNA'yı parçalamak için kullanılan yüksek sıcaklıklar ve sert pH değişimleri, protein zincirlerinin doğal üç boyutlu yapısını bozar, yani denatüre eder. Yapısı bozulan proteinlerin sudaki çözünürlüğü azalır, su tutma kapasitesi düşer ve gıdalarda emülsiyon oluşturma gibi fonksiyonel yetenekleri kaybolarak çökelmeler meydana gelir (Caliskan ve ark. 2026). Daha da önemlisi, bu ısı şoklar proteinin içinde yer alan lizin ve triptofan gibi ısıya duyarlı en önemli zorunlu (esansiyel) amino asitlerin kimyasal formunu bozarak sindirim sistemindeki emilimini engeller. Bu durum proteinin kalitesini gösteren uluslararası DIAAS ve PDCAAS skorlarının doğrudan düşmesine neden olur (Ayele ve ark. 2026a).

Isı veya kimyasallar yerine daha ılımlı bir ortam sunan enzimatik yöntemler tercih edildiğinde ise proteinin amino asit dizilimi ve yapısı başarıyla korunur. Fakat bu sefer de endüstriyel ölçeekte kullanılan bu özel enzimlerin yüksek maliyeti, fabrikalardaki üretim bütçelerini ciddi oranda artırır. Sonuç olarak, gıda amaçlı mikrobiyal protein üretiminde nükleik asit miktarını insan sağlığına zararsız seviyelere indirirken, aynı zamanda proteinin teknolojik yapısını, akışkanlığını ve besleyici değerini koruyabilmek, günümüzde hücresel tarımın endüstriyel ölçeğe taşınmasındaki en büyük biyoteknolojik ikilemlerden biridir (Alves ve ark. 2025; Ayele ve ark. 2026a).

Tek Hücre Proteini Kaynağı Mikroorganizmaların ve Tek Hücre Proteinlerinin Gıda Uygulamalarında Kullanımı

Dünya nüfusunun hızla artması, doğal kaynakların azalması ve hayvancılığın çevreye etkileri, gıda sektörünü sürdürülebilir ve besleyici yeni protein kaynakları aramaya yöneltmiştir (Sousa ve ark. 2023; Khan ve ark. 2024). Bu arayışta en çok öne çıkan alternatiflerden biri olan Tek Hücre Proteinleri (THP); mikroalgler, bakteriler, mayalar ve mantar liflerinden elde edilen yenilikçi gıda bileşenleridir. Düşük karbon ayak iziyle çevre dostu olan bu kaynaklar, zengin amino asit içerikleriyle de yüksek besin değerine sahiptir (Albuquerque ve ark. 2024; Yu ve ark. 2026). Günümüzde ekmek, yoğurt ve alternatif et ürünleri gibi pek çok gıdaya eklenen bu proteinler ürünlerin sadece besleyiciliğini artırmakla kalmayıp, gıdaların kıvam alması, su tutması ve doku kazanması gibi yapısal özelliklerini de doğrudan değiştirmektedir (Atubukha ve ark. 2026; Chen ve ark. 2026). Ancak bu protein kaynaklarının gıdalara eklenmesi, kendilerine has renk, deniz kokusu ve kıvam üzerindeki etkileri nedeniyle, her ürün için en doğru kullanım oranının belirlenmesini zorunlu kılmaktadır (Bassani ve ark. 2025; de Farias Silva ve ark. 2026).

Bir diğer araştırmada, glutensiz ekmek formülasyonlarına bezelye unu yerine % 2.5 ve % 5.0 oranlarında doğrudan toz haline getirilmiş *Chlorella sorokiniana* mikroalg büyüktülesi ilave edilmiştir. Bu katkı sayesinde ekmeğin protein değerinin % 13-26, toplam yağ içeriğinin de % 20-52 oranında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ekmeğin omega-3 (ALA) yağ asidi içeriği % 13-20 oranında artarken, değerli bir karotenoid olan lutein miktarı 10 katından çok daha fazla miktarda yükselmiştir. Ancak % 5 oranında alg eklenen ekmeklerde “sushi yosunu” veya “mate çayı” benzeri bir aroma,

acımsı bir tat ve tüketici beğenisini olumsuz etkileyen koyu yeşil bir renk oluştuğu için % 70'in üzerinde genel beğeni puanına ulaşan % 2.5'lik kullanım oranı ticari açıdan en ideal seviye olarak bildirilmiştir. (Diprat ve ark., 2020).

Hashempour-Baltork ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, tavuk nugget formülasyonlarında tavuk eti tamamen çıkarılarak yerine *Fusarium venenatum* mantarı proteini (mikoprotein) kullanılmış ve yapıyı birbirine bağlamak için % 0.5 oranında karragenan ilave edilmiştir. Araştırmacılar, bu karışımın, ürünün pişerken su kaybetmesini tavuk etine kıyasla % 33 oranında azalttığını, böylece su tutma kapasitesini koruyarak ekonomik bir avantaj sağladığını tespit etmişlerdir. Yapılan doku analizleri ile, elde edilen vegan nuggetların sertlik ve esneklik özelliklerinin yanı sıra çiğnenebilirlik ve iç bağlayıcılık (kohezyon) değerlerinin de geleneksel tavuk etiyle istatistiksel olarak aynı olduğu görülmüştür. Üründe mantarın yapısından kaynaklanan hafif bir renk koyulaşması belirlense de, çalışmada bu durumun formülasyondaki karabiber yerine, aynı baharat tadını verecek ama rengi bozmayacak olan beyaz biber kullanılarak kolayca aşılabileceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, üretilen alternatif nuggetlar duysal analizlerde tüketicilerden gerçek tavuk nuggetlar ile benzer genel beğeni puanları almıştır.

Albuquerque ve ark. (2024), geleneksel yoğurtlara *Spirulina platensis* ve *Chlorella vulgaris* gibi mikroalglerin % 2 oranına kadar eklenmesinin, üründeki protein miktarını % 5.2-6.3 yükselttiğin belirtmişlerdir. Ayrıca bu katkı, yoğurdu beta-glukan ve klorofil gibi faydalı antioksidanlarca zenginleştirmiştir. Araştırmacılara göre, üretim sırasında süt proteinleri ile mikroalg proteinlerinin birleşmesi, yoğurdun kıvamını artırarak daha sıkı ve bütünsel bir yapı kazandırmıştır. Çalışmada, besleyici faydaları en üst düzeye çıkarmak için % 2'lik oran üst sınır olarak önerilse de alglerin

getirdiği ot veya deniz benzeri tat-koku ile alışılışın dışındaki yeşil-mavi rengin tüketicie uzaklaştırmaması için, piyasaya sunulacak ürünlerde bu oranın % 1 seviyesinde tutulması gerektiği belirtilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, *Fusarium venenatum* adlı mantarın miselleri kullanılarak kırmızı ete benzer alternatif et ürünleri geliştirilmiştir. Mantarın yapısında doğal olarak bulunan galaktan, kitin ve kitosan gibi kıvam artırıcı maddeler ile RNA indirgeme sürecinden kalan bileşenlerin harcın yağ emülsifiye etme ve köpük oluştırma özelliklerini artırdığı ortaya konulmuştur. Bu sayede, tıpkı kırmızı etteki gibi yoğun, homojen ve sıkı laminasyonlu, viskoelastik bir lifli jel dokusu elde edilmiştir (Khan ve ark., 2024).

Mikroalglerin ekmekilikteki etkilerini inceleyen güncel bir araştırmada, buğday ununa % 4 oranında dondurularak kurutulmuş *Chlorella vulgaris*, *Phaeodactylum tricornutum* ve *Tetraselmis chuii* biyokütlesi eklenmiş ve her türün hamurdaki gluten matriksiyle kendine has bağlar kurduğu belirlenmiştir. Türler arasında *Chlorella vulgaris*, protein oranını % 14.7 ile en çok artıran bileşen olsa da gluten yapısını geवंşetip hamuru zayıflattığı için ekmek hacminde % 22.7'lik bir azalmaya ve dokuda sertleşmeye neden olmuştur. *Phaeodactylum tricornutum* ise hacim kaybını engelleyerek ekmeğin formunu korumasına yardımcı olmuş, ancak kırıntı yapısını bir miktar sertleştirmiştir. *Tetraselmis chuii* ise hamurun reolojik dengesini, ekmeğin spesifik hacmini ve yumuşaklığını tamamen korumayı başarmıştır. Ayrıca son üründe antioksidan kapasitesini, kalsiyum ve magnezyum mineral profilini ve fenolik bileşik içeriğini diğer iki türe kıyasla belirgin şekilde artırarak dikkat çekmiştir (Mahmoud ve ark., 2024).

Santhapur ve ark. (2024), patates proteini ile mantar misellerinin (mikoprotein) %15'er oranında karıştırılmasıyla hibrit

bir alternatif et formülasyonu geliştirmiştir. Tek başına zayıf bir jel oluşturan mikoproteinler, patates proteiniyle birleştiğinde ipliksi yapıları sayesinde dolgu malzemesi görevi görmüş ve protein ağını desteklemiştir. Bu etkileşim sonucunda ürünün sertliği, tek başına patates proteini içeren formülasyona kıyasla yaklaşık % 165 oranında artmış ve kopma anındaki esneme payı % 90'ın üzerine çıkmıştır. Böylece; kopma gerilimi, esneklik modülü ve genel yapısal özellikleri bakımından pişmiş tavuk etine benzer, lifli bir yapı elde edilmiştir.

Peynir altı suyu proteini yerine ikame olarak %10, %20 ve %30 oranlarında mikoprotein (*Fusarium venenatum*'dan elde edilen) kullanılarak hazırlanan yüksek proteinli barların kalite özelliklerinin incelendiği çalışmada, mikoprotein ilavesinin ürünün diyet lifi miktarını ve kokusunu iyileştirdiği belirlenmiştir. Ancak %20 ve %30 gibi yüksek kullanım oranlarının, depolama sırasında barların daha hızlı sertleşmesine ve proteinin sindirilebilirliğinin (kontrol grubundaki %84.5'ten %32.9'a kadar) belirgin şekilde düşürdüğü ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, barların duysal, yapısal ve sindirim özelliklerini bozmadan besin kalitesini artırabilmek için düşük oranda mikoprotein kullanımının ideal olduğu vurgulanmıştır (You ve ark., 2024).

Nohut, mercimek ve kinoa unlarıyla hazırlanan vegan burger köftelerine, laktik asit bakterileriyle fermente edilmiş iki farklı mikroalg biyokütlesi eklendiğinde doku üzerinde önemli etkiler gözlenmiştir. Harca % 4 oranında katılan *Haematococcus pluvialis* köfteyi sıkıştırıp esnek bir yapı kazandırırken, % 6 oranında eklenen *Porphyridium cruentum* burger yapısını zayıflatarak daha kırılgan hale getirmiştir. Renk açısından ise, *P. cruentum* ve fermantasyon işleminin birleşimi, ürüne pişmiş et rengini andıran koyu ve kırmızı tonlar kazandırmıştır. En dikkat çekici sonuçlar, iki algin % 3'er oranında birlikte kullanıldığı formülasyonda ortaya çıkmıştır. Bu

kombinasyonda algler birbirlerini destekleyerek hem doku hem de renk açısından gerçek ete en çok benzeyen ideal köfte yapısını oluşturmuştur (Bassani ve ark., 2025).

Yoğurtlar üzerine yapılan bir başka çalışmada, *Spirulina platensis* mikroalgi hem doğrudan ticari toz olarak hem de maltodekstrin ile kaplanmış şekilde % 0.5 ile % 2.0 arasında değişen oranlarda süte eklenmiştir. Yüksek protein yapısına sahip bu algin, yoğurdun ana iskeletini oluşturan kazein yapısıyla bağ kurarak ürünün kıvamını doğrudan etkilediği görülmüştür. Araştırma sonuçlarına göre, doğrudan ticari toz kullanımı yoğurdun jel yapısını zayıflatıp ürünü daha yumuşak ve akışkan hale getirirken, kaplanmış toz kullanımı malzemenin yoğurt içinde daha iyi dağılmasını sağlayarak daha sıkı, pürüzsüz ve kremamsı bir yapı oluşturmuştur. Diğer taraftan alg miktarının artması, yoğurdun rengini koyu mavi-yeşil tonlara çevirdiği ve ürüne yosun benzeri bir tat-koku verdiği için tüketicilerin ürün beğenisini olumsuz etkileyen en temel etken olmuştur. Ancak uygulanan kaplama işlemi, bu olumsuz tat, koku ve topaklanma sorunlarını büyük oranda gizlemeyi başarmıştır. Böylece, doğrudan toz kullanımında % 0.5 olan tüketici beğeni sınırı, kaplanmış toz sayesinde % 1.5 oranına kadar çıkarılabilmektedir (de Farias Silva ve ark., 2026).

Yu ve ark., (2026), farklı mantar suşlarından elde edilen mikoproteinlerin alternatif et ürünlerindeki performansını inceledikleri çalışmalarında, bu proteinlerin yapısal özelliklerine ve teknolojik fonksiyonlarına dikkat çekmişlerdir. Araştırmaya göre mikoproteinler, bünyelerinde barındırdıkları kitin, kitosan, nükleotid ve nükleozit gibi yüzey aktif bileşikler sayesinde su ve yağı güçlü bir şekilde bağlamakta, böylece sosis gibi emülsiyon bazlı ürünlerde pişme kayıpları ile yağ ayrılmasını en aza indirmişlerdir. Mantar hücre duvarındaki kitin ve beta-glukandan kaynaklanan sindirim zorluklarını aşmak amacıyla yüksek basınç homojenizasyonu ve

ultrason gibi modern, ısıl olmayan yöntemlerden yararlanılmıştır. Bu teknolojiler, mantarın hücre yapısını kırıp proteinlerin ikincil yapısını değiştirerek son ürünün su tutma kapasitesini, emülsiyon ve köpürme yeteneğini, yumuşaklığını ve en önemlisi vücuttaki sindirilebilirliğini belirgin şekilde artırmıştır.

Sonuç

Hızla artan küresel nüfusun beslenme ihtiyacını karşılamak ve protein üretimini sürdürülebilir bir zemine oturtmak, geleneksel tarım ve endüstriyel hayvancılığın mevcut sınırları düşünüldüğünde geleceğimizin en kritik dönemeçlerinden biridir. Bu noktada tek hücre proteini kaynağı olan canlılar iklim kısıtlamalarından ve coğrafi engellerden bağımsız, zamandan ve mekandan aşırı tasarruf sağlayan biyoteknolojik birer gıda fabrikası olarak çok güçlü bir alternatif sunmaktadır. Üstelik bu mikroorganizmaların tarımsal kalıntıları ve sanayi yan ürünlerini tüketerek katma değerli birer besine dönüşebilmesi, döngüsel biyoekonomi modelinin pratik hayattaki en somut karşılıklarından birini oluşturmaktadır.

Son dönemde fırıncılık mamullerinden fermente süt ürünlerine, nugget formülasyonlarından burger köftelerine kadar geniş bir yelpazede yürütülen çalışmalar, tek hücre proteinlerinin sadece besleyici birer takviye olmadığını açıkça kanıtlamaktadır. Bu mikrobiyal kaynaklar, gıdalara dahil edildikleri andan itibaren nemin korunması, yağ-su fazlarının dengelenmesi, elastik ve lifli jel dokularının örülmesi gibi kritik fonksiyonel görevleri başarıyla üstlenmektedir. Hatta bazı formülasyonlarda, geleneksel hayvansal proteinlerin reolojik performansını yakalamakta ve son ürünün yapısal kalitesini belirgin şekilde yukarı taşımaktadır.

Buna karşın, hücresel tarım ürünlerinin mutfaklarımıza ve endüstriyel üretim hatlarına kalıcı olarak yerleşebilmesi, çözülmesi gereken bazı teknik ve duyuşal hassasiyetleri de beraberinde

getirmektedir. Mikroalglerin baskın deniz kokusu ve yeşil-mavi renk tonları ya da küf misellerinin sıvıların akışkanlığı üzerindeki yoğunlaştırıcı etkileri, tüketici beğenisini doğrudan etkileyen unsurlardır. Bu durum, her gıda matrisi için besinsel zenginleşme ile damak tadı arasındaki o hassas dengeyi kurmayı, dolayısıyla mikroenkapsülasyon veya koku giderme gibi yenilikçi koruma ve maskeleye teknolojilerinden yararlanmayı zorunlu kılmaktadır. Aynı zamanda, özellikle bakteriyel kaynaklarda öne çıkan yüksek nükleik asit içeriğini insan sağlığına zararsız seviyelere indirirken proteinin doğal yapısını, çözünürlüğünü ve amino asit kalitesini koruyabilmek, biyoproses mühendisliğinin önündeki en büyük ikilemlerden biri olarak kalmaya devam etmektedir.

Gelecekte üretim maliyetlerini aşağı çekecek, protein kalitesini ise ödün vermeden koruyacak yeni nesil enzimatik ve ısıl olmayan işleme stratejilerinin geliştirilmesi, tek hücre proteinlerinin gıda pazarındaki kaderini belirleyecektir. Doğru ve dengeli formülasyonlarla harmanlanan mikrobiyal proteinler, yakın gelecekte karşı karşıya kalabileceğimiz küresel gıda krizlerine karşı elimizdeki en stratejik ve en güvenilir biyolojik kalkanlardan biri olacaktır.

Kaynakça

- Abdeen, A., Aboulela, M. E., Abo-Dahab, N. F., & Hassane, A. M. A. (2024). Single cell protein production from some food wastes using yeasts. *Archives of Agriculture Sciences Journal*, 7(3), 10-22. <https://doi.org/10.21608/aasj.2024.399216>
- Abdullahi, N., Abba Dandago, M., & Kabiru Yunusa, A. (2021). Review on Production of Single-Cell Protein from Food Wastes. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(6), 968-974. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i6.968-974.3758>
- Ahmed, M. G., Gouda, S. A., Donia, S., & Hassanein, N. M. (2025). Production of single cell protein by fungi from different food wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 5447-5462. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05478-5>
- Aidoo, R., Kwofie, E. M., Adewale, P., Lam, E., & Ngadi, M. (2023). Overview of single cell protein: Production pathway, sustainability outlook, and digital twin potentials. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 577-598. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.07.003>
- Albuquerque, R. C. V., de Farias Silva, C. E., Carneiro, W. d. S., Andreola, K., da Gama, B. M. V. , & da Silva, A. E. (2024). Incorporation of cyanobacteria and microalgae in yogurt: Formulation challenges and nutritional, rheological, sensory, and functional implications. *Applied Microbiology*, 4(4), 1493-1514. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4040103>
- Alves, S. J. F., Pires, E. B. E., Alexandre, M. A. S., Santos, C. C. A., Martin, J. G. P., Campelo, P. H., Martins, E., & Eller, M. R. (2025). Single-cell proteins as alternative sources of proteins

- and nutrients. *Food Research International*, 214, 116631.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116631>
- Amara, A. A., & El-Baky, H. H. A. (2023). Fungi as a Source of Edible Proteins and Animal Feed. *Journal of Fungi*, 9, 73.
<https://doi.org/10.3390/jof9010073>
- Anupama, & Ravindra, P. (2000). Value-added food: Single cell protein. *Biotechnology Advances*, 18(6), 459-479.
[https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00045-8)
- Asim, Z., Shahzad, H. M. A., Ouararhni, K., Almomani, F., & Rasool, K. (2026). Bioprocess parameter screening and condition selection for single-cell protein production using yeast co-culture and agro-food waste substrates. *Process Safety and Environmental Protection*, 211, 108834.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108834>
- Atubukha, B., Liu, K., Huang, Z., Jakab, I., Kóczán-Manninger, K., & Badak-Kerti, K. (2026). Microalgae techno-functional properties in bread, cookies, and pasta products: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Baskıdan önce çevrimiçi yayın.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.70428>
- Ayele, G., Admassu, H., Mosisa, G., Desalegn, A., & Abeje, M. (2026a). Nutritional, Functional and Safety Aspects of Single-Cell Protein Produced from Fruit Processing Waste. *Institute of Food Technologists*. 25:e70464.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.70464>
- Ayele, G., Admassu, H., Mosisa, G., Desalegn, A., & Abeje, M. (2026b). Emerging pretreatment technologies for agricultural wastes in single cell protein production. *Applied Food*

Research, 6, 101722.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101722>

Bassani, J. C., Martins, V. F. R., Barbosa, J., Coelho, M., Sousa, C., Steffens, J., Backes, G. T., Pereira, H., Pintado, M. E., Teixeira, P. C., Morais, A. M. M. B., & Morais, R. M. S. C. (2025). Exploring the development of a clean-label vegan burger enriched with fermented microalgae. *Foods*, 14(16), 2884 <https://doi.org/10.3390/foods14162884>

Baş, A., Peksever, D., & El, S. N. (2021). Sürdürülebilir Protein Kaynakları: Bitki, Böcek, Yapay Et ve Tek Hücre Proteinleri. 3. Uluslararası Türk Dünyası Fen Bilimleri ve Mühendislik Kongresi, Niğde, Türkiye.

Bratosin, B. C., Darjan, S., & Vodnar, D. C. (2021). Single cell protein: A potential substitute in human and animal nutrition. *Sustainability*, 13(16), 9284. <https://doi.org/10.3390/su13169284>

Caliskan, C., Nyhan, L., Hernández-Olivas, E., Feng, S., Zannini, E., Sozer, N., Brodkorb, A., & Arendt, E. K. (2026). Techno-functional and nutritional evaluation of Solein single-cell protein and its application in non-dairy yoghurt alternatives. *Food Research International*, 229, 118467. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.118467>

Chamodi, K. K. D., Vu, N. T., Domingos, J. A., & Loh, J. Y. (2025). Cellular Solutions: Evaluating Single-Cell Proteins as Sustainable Feed Alternatives in Aquaculture. *Biology*, 14(7), 764. <https://doi.org/10.3390/biology14070764>

Chen, C., Gao, Y., Xu, H., Yang, D., Zhou, G., & Ye, K. (2026). Construction and mechanism of mycoprotein-based meat analogue fibrous structures under the coupled effects of

- sodium alginate, 3D printing, and freezing. *Food Hydrocolloids*, 174, 112427. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2026.112427>
- de Farias Silva, C. E., Carneiro, W. d. S., Albuquerque, R. C. V., Andreola, K., & da Gama, B. M. V. (2026). Incorporation of commercial and agglomerated *Spirulina platensis* powder in yogurt: Effect on rheology, texture, color, and sensory properties. *ACS Food Science & Technology*, 6(2), 423-432. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.5c00930>
- Demirel, R., & Şentürk-Demirel, D. (2018). Tek Hücre Proteinlerinin İnsan ve Hayvan Beslemede Kullanımı. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(3), 327-336. <https://doi.org/10.21597/jist.458671>
- Dhiman, S., Mukherjee, G., Kumar, A., & Krishan, B. (2026). Alternative proteins from waste streams: a circular economy roadmap for sustainable food systems. *Sustainable Food Technology*. <https://doi.org/10.1039/d5fb00829h>
- Diprat, A. B., Silveira Thys, R. C., Rodrigues, E., & Rech, R. (2020). *Chlorella sorokiniana*: A new alternative source of carotenoids and proteins for gluten-free bread. *LWT - Food Science and Technology*, 134, 109974. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109974>
- Fasihi, M., Jouzi, F., Tervasmäki, P., Vainikka, P., & Breyer, C. (2025). Global potential of sustainable single-cell protein based on variable renewable electricity. *Nature Communications*, 14, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56364-1>
- Gao, L., Khoo, S. C., Zhang, Z., & Wu, X. (2025). Trends in sustainable single-cell protein from non-grain feedstocks.

- Gervasi, T., Pellizzeri, V., Calabrese, G., Di Bella, G., Cicero, N., & Dugo, G. (2018). Production of single cell protein (SCP) from food and agricultural waste by using *Saccharomyces cerevisiae*. *Natural Product Research*, 32(6), 648-653. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1332617>
- Gundupalli, M. P., Ansari, S., da Costa, J. P. V., Qiu, F., Anderson, J., Luckert, M., & Bressler, D. C. (2024). Bacterial single cell protein (BSCP): A sustainable protein source from methylobacterium species. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104426. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104426>
- Hashempour-Baltork, F., Jannat, B., Dadgarnejad, M., Mirza Alizadeh, A., Khosravi-Darani, K., & Hosseini, H. (2023). Mycoprotein as chicken meat substitute in nugget formulation: Physicochemical and sensorial characterization. *Food Science & Nutrition*, 11(7), 4289-4295. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3354>
- Janssen, M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2022). Microalgae based production of single-cell protein. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102705. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102705>
- Junaid, F., Khawaja, L. A., & Ali, S. (2020). Single cell protein as a potential meat substitute: A critical review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 9(2), 141-161.
- Kaur, N., & Chavan, A. (2022). Production of Single-Cell Protein from Fruit and Vegetable Waste Using an Isolated Strain of

Lactobacillus sp. *Food Nutrition and Technology*.
<https://doi.org/10.1089/ind.2022.0023>

- Khan, R., Hossain Brishti, F., Arulrajah, B., Meng Goh, Y., Abd Rahim, M. H., Karim, R., Hajar-Azhari, S., Kin Kit, S., Anwar, F., & Saari, N. (2024). Mycoprotein as a meat substitute: production, functional properties, and current challenges-a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 59, 522-544. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16791>
- Koukoumaki, D. I., Tsouko, E., Papanikolaou, S., Ioannou, Z., Diamantopoulou, P., & Sarris, D. (2024). Recent advances in the production of single cell protein from renewable resources and applications. *Carbon Resources Conversion*, 7, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.07.004>
- Kumar, R., Raj, T., Næss, G., Sørensen, M., & Dhawan, V. (2023). Opportunities and challenges in single-cell protein production using lignocellulosic material. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18: 310–321.
- Li, Y. P., Ahmadi, F., Kariman, K., & Lackner, M. (2024). Recent advances and challenges in single cell protein (SCP) technologies for food and feed production. *npj Science of Food*, 8, 66. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00299-2>
- Luecha, J., Lille, M., & Sozer, N. (2026). Acid-induced gelation of bacterial single cell protein as compared to soy and milk proteins: the effect of protein concentration and temperature. *Food Hydrocolloids*, 176, 112566. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2026.112566>
- Mahmoud, N., Ferreira, J., Raymundo, A., & Nunes, M. C. (2024). Enhancing the protein, mineral content, and bioactivity of

- wheat bread through the utilisation of microalgal biomass: A comparative study of *Chlorella vulgaris*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Tetraselmis chuii*. *Applied Sciences*, 14, 2483. <https://doi.org/10.3390/app14062483>
- Mekureyaw, M. F., Veedu, A. P., Li, B., & Zhang, Y. (2026). From waste to protein: feedstock selection and sustainability in bacterial single-cell protein production. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 52:101242.
- Mohite, J. A., Pardhi, K., & Rahalkar, M. C. (2025). Single-Cell Protein Using an Indigenously Isolated Methanotroph *Methylothermobacter* sp. *Microbiol. Res.*, 16, 171. <https://doi.org/10.3390/microbiolres16080171>
- Nalage, D. N., Khedkar, G. D., Kalyankar, A. D., Sarkate, A. P., Ghodke, S. R., Bedre, V. B., & Khedkar, C. D. (2016). Single Cell Proteins. *Encyclopedia of Food and Health*, 4, 790-794. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00628-0>
- Nangul, A., & Bhatia, R. (2013). Microorganisms: A Marvelous Source of Single Cell Proteins. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 3(1), 15-18.
- Nasseri, A. T., Rasoul-Amini, S., Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y. (2011). Single cell protein: Production and process. *American Journal of Food Technology*, 6(2), 103-116. <https://doi.org/10.3923/ajft.2011.103.116>
- Onyeaka, H., Anumudu, C. K., Okpe, C., Okafor, A., Ihenetu, F., Miri, T., Odeyemi, O. A., & Anyogu, A. (2022). Single Cell Protein for Foods and Feeds: A Review of Trends. *The Open Microbiology Journal*, 16(1), e187428582206160. <https://doi.org/10.2174/18742858-v16-e2206160>

- Raziq, A., Lateef, M., Ullah, A., Ullah, H., & Khan, M. W. (2020). Single cell protein (SCP) production and potential substrates: A comprehensive review. *Pure and Applied Biology*, 9(3), 1743-1754. <https://doi.org/10.19045/bspab.2020.90185>
- Salazar-López, N. J., Barco-Mendoza, G. A., Zuñiga-Martínez, B. S., Domínguez-Avila, J. A., Robles-Sánchez, R. M., Ochoa, M. A. V., & González-Aguilar, G. A. (2022). Single-Cell Protein Production as a Strategy to Reincorporate Food Waste and Agro By-Products Back into the Processing Chain. *Bioengineering*, 9(11), 623. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9110623>
- Santhapur, R., Jayakumar, D., & McClements, D. J. (2024). Formation and characterization of mycelium-potato protein hybrid materials for application in meat analogs or substitutes. *Foods*, 13, 4109. <https://doi.org/10.3390/foods13244109>
- Sekoai, P. T., Roets-Dlamini, Y., O'Brien, F., Ramchuran, S., & Chunilall, V. (2024). Valorization of Food Waste into Single-Cell Protein: An Innovative Technological Strategy for Sustainable Protein Production. *Microorganisms*, 12(1), 166. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12010166>
- Sharif, M., Zafar, M. H., Aqib, A. I., Saeed, M., Farag, M. R., & Alagawany, M. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. *Aquaculture*, 531, 735885. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735885>
- Sousa, V., Pereira, R. N., Vicente, A. A., Dias, O., & Geada, P. (2023). Microalgae biomass as an alternative source of biocompounds: New insights and future perspectives of

- extraction methodologies. *Food Research International*, 173, 113282. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113282>
- Thiviya, P., Gamage, A., Kapilan, R., Merah, O., & Madhujith, T. (2022). Single cell protein production using different fruit waste: A review. *Separations*, 9(7), 178. <https://doi.org/10.3390/separations9070178>
- Tian, Y., Li, J., Meng, J., & Li, J. (2023). High-yield production of single-cell protein from starch processing wastewater using co-cultivation of yeasts. *Bioresource Technology*, 370, 128527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128527>
- Tropea, A., Ferracane, A., Albergamo, A., Potorti, A. G., Lo Turco, V., & Di Bella, G. (2022). Single cell protein production through multi food-waste substrate fermentation. *Fermentation*, 8(3), 91. <https://doi.org/10.3390/fermentation8030091>
- Vethathirri, R. S., Santillan, E., Thi, S. S., Hoon, H. Y., & Wuertz, S. (2023). Microbial community-based production of single cell protein from soybean-processing wastewater of variable chemical composition. *Science of the Total Environment*, 873, 162241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162241>
- Yang, Y.Q., Li, X., Wang, Z.Z., Huang, X. Y., Zeng, D. W., Zhao, X. Q., Liu, Z. Q., & Zhang, F. L. (2025). Microfibrillated cellulose derived from *Gelidium amansii* controls the thermo-physical properties of emulsion gel composite as the base for cheese alternative. *Bioresource Technology*, 433, 132649. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132649>
- Yu, R., Rathnayake, P. Y., Nam, C., Yeo, S. E., Kim, T.-K., Lee, H. J., & Yong, H. I. (2026). A comprehensive review on

mycoprotein-based meat analog production: nutritional, functional, physicochemical, and safety aspect. *Food Science and Biotechnology*, 35, 307-325. <https://doi.org/10.1007/s10068-025-02059-8>

You, X.-Y., Ding, Y., Bu, Q.-Y., Wang, Q.-H., & Zhao, G.-P. (2024). Nutritional, textural, and sensory attributes of protein bars formulated with mycoproteins. *Foods*, 13, 671. <https://doi.org/10.3390/foods13050671>

BÖLÜM 5

POSTBİYOTİKLERİN BAĞIRSAK-BEYİN EKSENİ ÜZERİNE ETKİLERİ

ELİF NAZ GÜRSEL¹

Doç. Dr. HATİCE AHU KAHRAMAN²

Giriş

İnsan vücudu, kendi hücrelerinin yanı sıra trilyonlarca mikroorganizmaya ev sahipliği yapar. Bu mikrobiyal topluluğun en yoğun olduğu bölge bağırsaklar olup “bağırsak mikrobiyotası” olarak adlandırılır (Kährström ve ark., 2016; Haller, 2021). Bağırsak mikrobiyotası bakteriler başta olmak üzere virüs, arkea ve mantarlardan oluşan dinamik bir ekosistemdir (Montiel-Castro ve ark., 2013; Aktürk ve Önal, 2024). Mikrobiyota; sindirim, metabolizma ve bağışıklık sistemiyle yakın etkileşim içinde olduğundan, çok sayıda hastalığın patofizyolojisinde önemli bir bileşen olarak kabul edilmektedir (Dong ve ark., 2019; Nathan ve ark., 2021; Sommer ve ark., 2017).

¹ Veteriner Hekim, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0005-9033-4518

²Doç. Dr, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Gıda Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0001-6600-239X

Mikrobiyotanın merkezi sinir sistemiyle çift yönlü etkileşimi “bağırsak-beyin eksenini” olarak tanımlanır. Bu eksen sinirsel, endokrin ve immün yollar üzerinden çalışır (Cryan ve Dinan, 2012; Montiel-Castro ve ark., 2013). Güncel araştırmalar, mikrobiyota kaynaklı ürünlerin yalnızca bağırsak sağlığında değil, ruhsal durum, stres yanıtı ve nöroinflamasyon süreçlerinde de etkili olabileceğini göstermektedir (O’Mahony ve ark., 2015; Caspani ve Swann, 2019).

Postbiyotik Kavramı

Probiyotikler, FAO/WHO tarafından yeterli miktarda alındığında konakçıya sağlık yararı sağlayan canlı mikroorganizmalar olarak tanımlanmaktadır (FAO/WHO, 2002). Prebiyotikler ise konakçı mikroorganizmalar tarafından seçici olarak kullanılan ve sağlık yararı sağlayan substratlar olarak ifade edilmektedir (Gibson ve ark., 2017). Bunun yanında paraprobiyotikler, canlı olmayan veya inaktive edilmiş probiyotik hücreleri tanımlamakta olup, uygun miktarlarda uygulandıklarında benzer faydalar gösterebilmektedir (Taverniti ve Guglielmetti, 2011; Tsilingiri ve Rescigno, 2013). Canlı probiyotiklerin özellikle immün sistemi baskılanmış bireylerde mikrobiyal translokasyon, enfeksiyon ve aşırı immün yanıt gibi riskler oluşturabileceği bildirilmektedir (Doron ve Snyderman, 2015). Bu riskler, mikroorganizmaların ısıl işlem, mekanik parçalama, UV veya gama ışınlama, yüksek basınç ve asit uygulamaları gibi yöntemlerle inaktive edilmesiyle azaltılabilmekte; bu süreçlerde hücreler çoğalma yeteneğini kaybetse de biyolojik etkilerini büyük ölçüde koruyabilmektedir (de Almada ve ark., 2016). Bu bağlamda, ISAPP tarafından 2021 yılında yapılan tanıma göre postbiyotikler, “canlı olmayan mikroorganizmaları ve/veya bunların bileşenlerini içeren ve konakçıya sağlık yararı sağlayan preparatlar” olarak ifade edilmektedir (Salminen ve ark., 2021). Bu tanım, postbiyotiklerin yalnızca tek bir metabolitten ibaret olmadığını; inaktive mikrobiyal

hücreleri, hücre duvarı fraksiyonlarını, hücre içeriğini ve mikrobiyal kökenli biyoaktif bileşenleri kapsayan kompleks yapılar olduğunu vurgulamaktadır. Nitekim postbiyotikler; inaktive hücreler, hücre parçaları, biyoaktif peptitler, proteinler, kısa zincirli yağ asitleri, poliaminler, vitaminler, bakteriyosinler ve diğer mikrobiyal metabolitleri içeren geniş bir bileşen grubunu kapsamaktadır (Aguilar-Toalá ve ark., 2018; Cicienia ve ark., 2014).

Postbiyotik kavramının ortaya çıkışı, probiyotiklerin sağladığı faydaların daha güvenli ve daha stabil formlarda sunulması gereksinimiyle ilişkilidir (Taverniti ve Guglielmetti, 2011; Tsilingiri ve Rescigno, 2013). Canlı hücre içermemeleri nedeniyle postbiyotikler, özellikle bağışıklık sistemi baskılanmış bireyler açısından daha güvenli kabul edilmekte (Deshpande ve ark., 2018; Piqué ve ark., 2019) ve ısı, pH değişimleri ile oksidatif stres gibi çevresel koşullara karşı daha yüksek stabilite göstermeleri sayesinde gıda işleme süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır (Wegh ve ark., 2019; Ji ve ark., 2023). Bununla birlikte, ISAPP yalnızca saflaştırılmış tekil metabolitlerin postbiyotik olarak değerlendirilmemesi gerektiği özellikle vurgulanmış; postbiyotik etkinin başlangıç mikroorganizması, uygulanan inaktivasyon yöntemi ve ürün matrisi gibi faktörlere bağlı olduğu ve bu nedenle standardizasyonun kritik olduğunu belirtmiştir (Salminen ve ark., 2021).

Bağırsak-Beyin Ekseni ve Postbiyotik İlişkisi

Bağırsak-beyin ekseni, bağırsak ve beyin arasında çift yönlü iletişim sağlayan sinirsel, endokrin ve immün yolların oluşturduğu kompleks bir ağdır (Montiel-Castro ve ark., 2013; Cryan ve Dinan, 2012). Bu iletişimde mikrobiyota kökenli metabolitler, özellikle kısa zincirli yağ asitleri, nörotransmitter prekürsörleri ve

inflamatuvar/antiinflamatuvar sinyaller kritik rol oynamaktadır (O'Mahony ve ark., 2015; Caspani ve Swann, 2019).

Beslenme yoluyla alınan bileşenlerin bağırsak mikrobiyotası ve onun metabolik atıkları üzerindeki etkisi, dolaylı olarak konak fizyolojisi ve davranışları üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle fonksiyonel gıda geliştirme süreçlerinde bağırsak-beyin eksenini odaklı yaklaşımlar giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Mills ve ark., 2019; Marco ve ark., 2017). Bu bağlamda postbiyotikler, canlı mikroorganizma gerektirmeksizin mikrobiyota kaynaklı sinyal mekanizmalarını hedefleyebilen yenilikçi ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır (Wegh ve ark., 2019; Salminen ve ark., 2021).

Postbiyotikler, canlı hücre içermemeleri nedeniyle ısı, pH değişimleri, oksidatif stres ve depolama koşulları gibi çevresel faktörlere karşı yüksek stabilite göstermekte ve bu özellikleri sayesinde işlenmiş ve uzun raf ömrüne sahip gıdalarda fonksiyonel bileşen olarak kullanım açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Marco ve ark., 2021; Ji ve ark., 2023). Ayrıca canlı mikroorganizmaların neden olabileceği bakteriyemi veya aşırı inflamatuvar yanıt riskini taşımamaları, özellikle immün sistemi baskılanmış bireyler açısından daha güvenli bir alternatif oluşturmaktadır (Deshpande ve ark., 2018; Piqué ve ark., 2019).

Postbiyotiklerin fermente gıdalar ve nutrasötik formülasyonlardaki kullanımı; bağırsak bariyer fonksiyonunun güçlendirilmesi, immün yanıtın dengelenmesi ve inflamasyonun azaltılması gibi çok yönlü biyolojik etkiler çerçevesinde değerlendirilmektedir (Cicenia ve ark., 2014; Wegh ve ark., 2019; Marco ve ark., 2017). Bağırsak bariyeri, epitel hücreleri ve mukus tabakasının patojen geçişini engelleme kapasitesini ifade etmekte olup, postbiyotikler hücre duvarı bileşenleri, kısa zincirli yağ asitleri ve mikrobiyal peptitler aracılığıyla sıkı bağlantı proteinlerini destekleyerek bu bariyerin korunmasına katkı sağlamaktadır

(Aguilar-Toalá ve ark., 2018). Bunun yanı sıra, bazı postbiyotik bileşenlerin gıdaların duysal özelliklerini iyileştirdiği, mikrobiyolojik stabiliteyi artırdığı ve raf ömrünü uzattığı bildirilmektedir (Chudzik ve ark., 2021; Braga ve ark., 2024). Bu yönüyle postbiyotikler, yalnızca sağlık üzerindeki etkileriyle değil, aynı zamanda gıda güvenliği ve kalite parametrelerinin iyileştirilmesine katkılarıyla da gıda bilimi açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır (Ji ve ark., 2023).

Postbiyotiklerin Bağırsak-Beyin Eksenine Etkileri

Bağırsak-beyin eksen, gastrointestinal sistem ile merkezi sinir sistemi arasında çift yönlü bir iletişim ağıdır. Bu iletişim sinirsel, hormonal ve bağışıklık temelli yollar aracılığıyla gerçekleşir (Montiel-Castro ve ark.,2013; Cryan & Dinan, 2012). Güncel çalışmalar, bu eksenin yalnızca probiyotikler değil, aynı zamanda postbiyotik metabolitler aracılığıyla da düzenlenebildiğini göstermektedir (Salminen ve ark.,2021; Patricio-Martínez ve ark.,2025). Postbiyotikler, mikrobiyota kaynaklı sinyallemede yer alan nöroaktif bileşenler, antiinflamatuvar moleküller ve bağırsak bariyerini destekleyen ajanlar sayesinde, bağırsak-beyin iletişiminin sürekliliğine katkıda bulunur (Mosca ve ark.,2022; O’Riordan ve ark.,2025).

Nöroaktif Bileşenlerin Üretimi (Serotonin, GABA, Dopamin Prekürsörleri)

Bağırsak mikrobiyotası tarafından üretilen bazı metabolitler, nörotransmitter sentezinde rol oynayarak bağırsak-beyin ekseninde etkiler oluşturur (Cryan & Dinan, 2012; O’Mahony ve ark.,2015). Postbiyotikler, bu etkileri canlı mikroorganizmalar olmadan da sürdürebilen nöroaktif bileşenler içerir (Patricio-Martínez ve ark.,2025). Özellikle triptofan metabolitleri, bütirat ve

bazı biyoaktif peptitler, serotonin, dopamin ve GABA gibi nöroaktif bileşiklerin üretimini destekler (Mosca ve ark.,2022; O’Riordan ve ark.,2025). Bu nöroaktif maddeler, vagal sinir aktivasyonu ve kan-beyin bariyeri aracılığıyla merkezi sinir sistemiyle iletişime geçer (Loh ve ark.,2024). Bu mekanizma sayesinde postbiyotikler, stres, anksiyete ve duygu durum bozuklukları gibi durumlarda dengeleyici etki oluşturabilir (Braga ve ark.,2024; Patricio-Martínez ve ark.,2025). Dolayısıyla postbiyotikler, “psikobiyotik potansiyel” taşıyan bileşenler arasında değerlendirilmektedir (Salminen ve ark.,2021; Wegh ve ark.,2019).

Mikrobiyota-Komünikasyon Mekanizmaları

Bağırsak mikrobiyotası, sinir sistemiyle; sinirsel yol, endokrin yol ve bağışıklık sistemi yoluyla olmak üzere üç temel mekanizma aracılığıyla iletişim kurar. (Cryan & Dinan, 2012; Ridaura & Belkaid, 2015). Postbiyotikler, bu iletişim yollarında görev alan metabolitler ve hücre duvarı bileşenleri aracılığıyla bağırsak-beyin eksenini fonksiyonunu destekler (Mosca ve ark.,2022). Özellikle kısa zincirli yağ asitleri, kan-beyin bariyerinin geçirgenliğini düzenleyerek nöronal işlevleri olumlu etkiler (O’Riordan ve ark.,2025; Loh ve ark.,2024). Ayrıca postbiyotikler, bağırsak mukozasında serotonin üretimini artırarak nörotransmitter dengesini destekler (Patricio-Martínez ve ark.,2025). Bu mekanizma, stres yanıtının düzenlenmesi ve duygudurum dengelemesi açısından önemlidir (Cryan & Dinan, 2012; Braga ve ark.,2024).

Nörotransmitter Düzenlenmesi ve Nöroinflamasyonun Azaltılması

Postbiyotikler, bağırsak hücreleri ve sinir sistemi arasındaki nörokimyasal etkileşimleri modüle eden bileşenler içerir (Salminen

ve ark.,2021). Özellikle GABA, serotonin (5-HT) ve dopamin prekürsörleri gibi nörotransmitterlerin sentezinde etkili olan metabolitler, postbiyotiklerin beyin fonksiyonları üzerindeki rolünü açıklamaktadır (Cryan & Dinan, 2012; O'Mahony ve ark.,2015). Bu bileşikler, nöronal uyarılabilirliği dengeleyerek anksiyete, stres ve depresyon benzeri davranışların azalmasına katkıda bulunur (Patricio-Martínez ve ark.,2025). Aynı zamanda, kısa zincirli yağ asitleri ve peptitler mikrogial aktiviteyi baskılayarak nöroinflamasyonu azaltır (Mosca ve ark.,2022; O'Riordan ve ark.,2025). Bu mekanizmalar, bağırsak kaynaklı inflamasyonun merkezi sinir sistemine etkilerini sınırlandırarak nörodejeneratif hastalıkların önlenmesinde de rol oynayabilir (Loh ve ark.,2024; Wegh ve ark.,2019).

Stres, Anksiyete ve Duygudurum Üzerine Etkiler

Son yıllarda yapılan çalışmalar, postbiyotiklerin psikobiyotik potansiyelini desteklemektedir. Bu terim, bağırsak-beyin ekseninden ruhsal dengeyi olumlu yönde etkileyen mikrobiyal veya mikrobiyal kökenli ürünleri ifade eder (Cryan & Dinan, 2012). Postbiyotik desteklerinin, deneysel modellerde stres ve anksiyete semptomlarını azalttığı ve duygudurum düzenlenmesini desteklediği gösterilmiştir (Patricio-Martínez ve ark.,2025; Mosca ve ark.,2022). Bu etki, HPA (hipotalamo–hipofiz–adrenal) ekseninin dengelenmesi ve kortizol düzeylerinin azalması ile ilişkilidir (Braga ve ark.,2024; O'Riordan ve ark.,2025). Dolayısıyla postbiyotikler, stres yönetimi ve ruhsal sağlık destek programlarında doğal biyoterapötik adaylar olarak değerlendirilmektedir (Salminen ve ark.,2021; Wegh ve ark.,2019).

DeneySEL ve Klinik Çalışmalardan Bulgular

Hem hayvan modelleri hem de klinik çalışmalar postbiyotiklerin bağırsak-beyin eksenini üzerindeki olumlu etkilerini desteklemektedir. Örneğin inaktive *Lactobacillus rhamnosus* içeren postbiyotik karışımlar, deney hayvanlarında anksiyete benzeri davranışları azalttığı bildirilmiştir (Mosca ve ark.,2022). Klinik düzeyde yapılan çalışmalarda ise, postbiyotik takviyesinin duygudurum bozukluğu olan bireylerde stres düzeylerini düşürdüğü ve uyku kalitesini artırdığı gözlemlenmiştir (Patricio-Martínez ve ark.,2025; O’Riordan ve ark.,2025). Bununla birlikte, bu sonuçların genelleştirilebilmesi için daha geniş kapsamlı klinik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Salminen ve ark.,2021; Ji ve ark.,2023). Yine de mevcut veriler, postbiyotiklerin yalnızca sindirim sağlığı değil, aynı zamanda nöropsikolojik durum açısından da umut verici bileşenler olduğunu göstermektedir (Wegh ve ark.,2019; Braga ve ark.,2024).

Sonuç

Postbiyotikler, bağırsak-beyin eksenini üzerinde etkili olan mikrobiyota kökenli bileşenler olarak, hem gıda bilimi hem de sağlık bilimleri açısından giderek önem kazanan bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Bu bileşenlerin biyokimyasal ve fonksiyonel özelliklerinin doğru şekilde anlaşılması; bağırsak bariyerinin korunması, immün yanıtın düzenlenmesi ve nöroinflamatuvar süreçlerin kontrol altına alınması açısından temel bir rol oynamaktadır. Postbiyotiklerin yüksek stabilite göstermeleri ve canlı mikroorganizma içermemeleri, bu bileşenlerin gıda işleme süreçlerinde güvenli ve uygulanabilir alternatifler olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Gelecekte, özellikle farklı postbiyotik bileşenlerin etki mekanizmalarının aydınlatıldığı, doz-etki ilişkilerinin ortaya konduğu ve klinik düzeyde desteklenen

Çalışmaların artması, bu bileşenlerin fonksiyonel gıdalardaki kullanım potansiyelini daha net ortaya koyacaktır. Bu kapsamda postbiyotikler, çok yönlü biyolojik etkileri ve teknolojik avantajları ile hem fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarına hem de bağırsak-beyin eksenine yönelik bilimsel araştırmalara önemli katkılar sunacak güçlü adaylar arasında yer almaktadır.

Kaynakça

Aguilar-Toalá, J. E., Garcia-Varela, R., Garcia, H. S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A. F., Vallejo-Cordoba, B., & Hernández-Mendoza, A. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.009>

Aktürk, H., & Önal, M. (2024). *Sağlık & Bilim 2024: Güncel Tıp-III*. Efe Akademi Yayınları.

Braga, J. D., Thongngam, M., & Kumrungsee, T. (2024). Gamma-aminobutyric acid as a potential postbiotic mediator in the gut–brain axis. *Npj Science of Food*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.1038/s41538-024-00253-2>

Caspani, G., Kennedy, S., Foster, J. A., & Swann, J. (2019). Gut microbial metabolites in depression: Understanding the biochemical mechanisms. *Microbial Cell*. <https://doi.org/10.15698/mic2019.10.693>

Chudzik, A., Orzyłowska, A., Rola, R., & Stanisław, G. J. (2021). Probiotics, Prebiotics and Postbiotics on Mitigation of Depression Symptoms: Modulation of the Brain–Gut–Microbiome Axis. *Biomolecules*, 11(7), 1000. <https://doi.org/10.3390/biom11071000>

Cicenia, A., Scirocco, A., Carabotti, M., Pallotta, L., Marignani, M., & Severi, C. (2014). Postbiotic Activities of Lactobacilli-derived Factors. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 48, S18. <https://doi.org/10.1097/MCG.0000000000000231>

Cryan, J. F., & Dinan, T. G. (2012). Mind-altering microorganisms: The impact of the gut microbiota on brain and behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(10), 701-712. <https://doi.org/10.1038/nrn3346>

de Almada, C. N., Almada, C. N., & Martinez, R. C. (2016). Paraprobiotics and postbiotics: Concepts and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 1–9.

Deshpande, G., Athalye-Jape, G., & Patole, S. (2018). Postbiotics: An emerging science to develop next generation therapeutics. *Nutrients*, 10, 1538.

Dong, L. N., Wang, M., Guo, J., & Wang, J. P. (2019). Role of intestinal microbiota and metabolites in inflammatory bowel disease. *Chinese Medical Journal*, 132(13), 1610–1614.

Doron, S., & Snyderman, D. R. (2015). Risk and safety of probiotics. *Clinical Infectious Diseases*, 60, S129–S134.

FAO/WHO (2002). Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria. FAO/WHO Expert Consultation Report.

Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., & Reid, G. (2017). Expert consensus document: The ISAPP consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 14, 491–502.

Haller, D. (2021). Intestinal microbiota in health and disease. *International Journal of Medical Microbiology*, 311(5), 151514.

Ji, J., Jin, W., Liu, S., Jiao, Z., & Li, X. (2023). Probiotics, prebiotics, and postbiotics in health and disease. *MedComm*, 4(6), e420. <https://doi.org/10.1002/mco2.420>

Loh, J. S., Mak, W. Q., Tan, L. K. S., Ng, C. X., Chan, H. H., Yeow, S. H., ... Khaw, K. Y. (2024). Microbiota–gut–brain axis and its therapeutic applications in neurodegenerative diseases. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), 37. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01743-1>

Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., ... Hutkins, R. (2017). Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond. *Current opinion in biotechnology*, 44, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.010>

Marco, M. L., Sanders, M. E., Gänzle, M., & Arrieta, M. C. (2021). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus on fermented foods. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(3), 196–208.

Mills, S., Stanton, C., Lane, J. A., Smith, G. J., & Ross, R. P. (2019). Precision nutrition and the microbiome. *Nutrients*, 11(4), 923.

Montiel-Castro, A. J., González-Cervantes, R. M., Bravo-Ruiseco, G., & Pacheco-Lopez, G. (2013). The microbiota-gut-brain axis: Neurobehavioral correlates, health and sociality. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00070>

Mosca, A., Abreu Y Abreu, A. T., Gwee, K. A., Ianiro, G., Tack, J., Nguyen, T. V. H., & Hill, C. (t.y.). The clinical evidence for postbiotics as microbial therapeutics. *Gut Microbes*, 14(1), 2117508. <https://doi.org/10.1080/19490976.2022.2117508>

Nathan, N. N., Philpott, D. J., & Girardin, S. E. (2021). The intestinal microbiota: From health to disease. *Microbes and Infection*, 23, 104849.

O'Mahony, S. M., Clarke, G., Borre, Y. E., Dinan, T. G., & Cryan, J. F. (2015). Serotonin, tryptophan metabolism and the brain-gut-microbiome axis. *Behavioural Brain Research*, 277, 32-48. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.07.027>

O'Riordan, K. J., Moloney, G. M., Keane, L., Clarke, G., & Cryan, J. F. (2025). The gut microbiota-immune-brain axis:

Therapeutic implications. *Cell Reports. Medicine*, 6(3), 101982.
<https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2025.101982>

Patricio-Martínez, A., Patricio, F., Macuil-Chapuli, E., Martínez-Juárez, E. Á., Flores-Díaz, S., Cedillo-Ramírez, M. L., & Limón, I. D. (2025). The role of probiotics, prebiotics, and postbiotics: Cellular and molecular pathways activated on glial cells in Alzheimer's disease. *Frontiers in Neuroscience*, 19.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1598011>

Piqué, N., Berlanga, M., & Miñana-Galbis, D. (2019). Health benefits of postbiotics. *Microorganisms*, 7, 473.

Ridaura, V. K., & Belkaid, Y. (2015). Gut microbiota and immunity. *Nature Reviews Immunology*, 15, 345–356.

Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., ... 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.
<https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6>

Sommer, F., Anderson, J. M., Bharti, R., Raes, J., & Rosenstiel, P. (2017). Microbiota resilience. *Nature Reviews Microbiology*, 15, 630–638.

Taverniti, V., & Guglielmetti, S. (2011). Immunomodulatory properties of probiotics. *Trends in Food Science & Technology*, 22, 521–526.

Tsilingiri, K., & Rescigno, M. (2013). *Postbiotics: What else?* <https://doi.org/10.3920/BM2012.0046>

Wegh, C. A. M., Geerlings, S. Y., Knol, J., Roeselers, G., & Belzer, C. (2019). Postbiotics in nutrition. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 4673.

BÖLÜM 6

ANTİDİYABETİK GIDALAR ÜZERİNE ÇALIŞMALAR

MURAT KAYA¹

Giriş

Şeker hastalığı (*Diabetes mellitus*) insülin üreten pankreas β hücrelerinin ya doğuştan otoimmün sistem zararına uğraması ya da fazla insülin maruziyeti nedeniyle görevini yerine getirememesi nedeniyle ortaya çıkan bir hastalıktır (American Diabetes Association, 2017). Son yıllarda gittikçe toplum içerisinde sıklıkla karşılaşılan, uzuv kaybı, ölüm gibi ciddi sağlık sorunları yaşatan önemli bir metabolik hastalıktır (Arroyave ve ark., 2020). Hastalığın bir başka farklı ve ciddi yönü vücuttaki tüm hücre ile dokuları etkilemesidir. Tüm vücuda oksijen ve besin kaynağı taşıyan kandaki yüksek glukoz seviyesi oksidatif stresi tetiklemektedir (González ve ark., 2023).

Dünya Sağlık Örgütü verilerin göre diyabet hastalığından muzdarip insan sayısı 1990 yılında 200 milyon iken, bu sayı 2022 yılında 830 milyona yükselmiştir. Bir başka açıdan değerlendirmek gerekirse 32 yıl içerisinde diyabet sorununda ~4 kat artış

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kayseri Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0002-3181-2517

görülmüştür Hastalığın, dünyadaki gelişmiş ülke vatandaşlarından ziyade düşük ve orta gelir seviyesine sahip ülke vatandaşlarında yaygın olması manidardır (Sun ve ark., 2022; WHO, 2026). Bu durum kısıtlı imkanlar nedeniyle karbonhidratça zengin, protein ve yağca fakir yanlış beslenme mecburiyetinden kaynaklanıyor olabilir. Az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaşayan bireylerin karbonhidratça zengin beslenme alışkanlıkları bir seçim değil çaresizliktir.

2022 yılı verilerine göre gelişmemiş, orta gelişmişliğe sahip ülke insanlarında çok görülen bu hastalığın tedavisinde ilaç kullanım oranının % 50 olduğu görülmektedir (WHO, 2026).

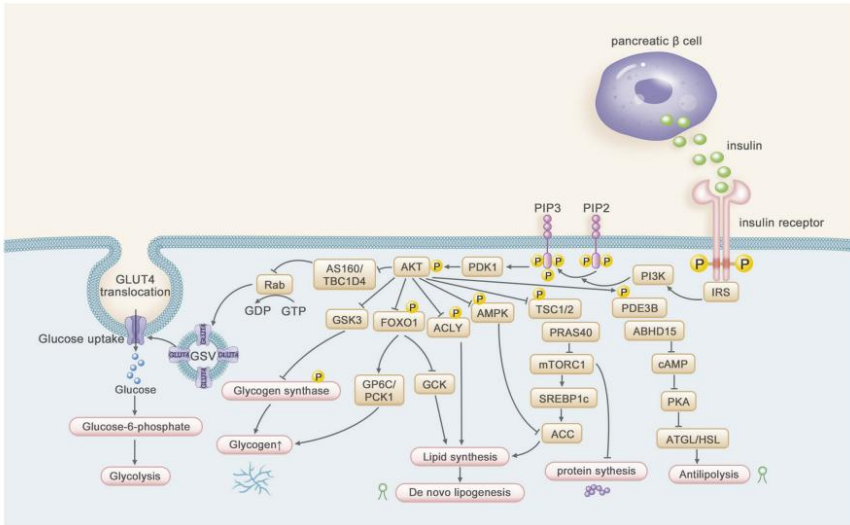
Diyabet, İnsülin Direnci ve Neden Olduğu Hastalıklar

Günümüz insanı için sık karşılaşılan bir başka sağlık problemi insülin direncidir. Pankreastan salgılanan ve kan şeker seviyesini kontrol eden insülin hormonuna çeşitli nedenlerle hücreler tam olarak cevap verememekte (insülin hormonu vücut için görevini yeterince yerine getirememekte) bunun sonucunda enerji üretmede ana molekül olan glikoz hücre içerisinde yeterince yada hiç girememektedir (Şekil 1). İnsülin direnci ile diyabet arasındaki bağlantı ise insülin direnci olan bireylerin ileride potansiyel diyabet hastası adayı olmalarından kaynaklamaktadır. İnsülin direncinin neden olduğu hastalıklar arasında sadece diyabet bulunmamaktadır. İnsülin direncine sahip bireylerin etkilendiği organlar ve görülen diğer hastalıkları özetleyecek olursak;

- Beyin: Alzheimer,
- Dolaşım sistemi: Kalp damar hastalıkları,
- Tüm vücut: Enflamasyon, obezite,
- Kas dokuları: Enflamasyon, tip 2 diyabet,

- Karaciğer: Metabolik fonksiyon bozuklukları, karaciğer yağlanması
- Kanser: Kolon, uterus, meme, özefagus, pankreas, böbrek, prostat
- Boşaltım sistemi: Sık idrara çıkma (CDC, 2010; Li ve ark., 2022),

Şekil 1 Hücre İçerisine İnsülin ve Glikoz Giriş Mekanizması



Kaynak: Li ve ark., 2022

Şekilden de anlaşılabacağı gibi hücre içerisine insülin reseptörleri aracılığıyla önce insülin girmelidir ki sonrasında da glikoz hücreye giriş yapabilsin.

Modern dünyanın getirdiği aşırı beslenme ve düşük fiziksel aktiviteli yaşama şekli başlangıçta insülin direnci, sonrasında ise diyabet olarak insanda karşılık bulmaktadır. Anti diyabetik besinleri doğrudan tüketmek yada hiç olmazsa antidiyabetik bileşenlerle zenginleştirilmiş gıdalarla beslenmek, diyabetle mücadele açısından belki tam anlamıyla bir çözüm olmayabilir ama sağlıklı yaşam

konseptinde, bütünsel tamamlayıcı tedavi yaklaşımında destekleyici olacaktır. Bir başka ifadeyle dokuların insüline direnci, kan glikoz seviyelerinin artmasına, hiperinsülinemiye, β -hücre disfonksiyonuna ve nihayetinde tip 2 diyabet gelişimine yol açmaktadır (Li ve ark., 2022).

Modern beslenme stilinde karbonhidrat, yağ ve tuz oranı yüksek beslenme tipi benimsenmiş durumdadır. Buna rağmen sağlıklı yaşam adına hayatına egzersizi, stresten uzak kalmak için çeşitli faaliyetleri ve sağlıklı-doğal gıdalarla beslenmeyi hayat felsefesi haline getirmiş ciddi bir kesimde vardır (Galanakis, 2020). Bu kişilerin antidiyabetik özellikte biyoaktif bileşenler içeren besinleri tüketmesi diyabet ve kan şekeri dalgalanması ile mücadelede önemli bir alternatif olabilir. Antidiyabetik özellikteki biyoaktif bileşikler içeren pek çok bitkisel bazlı ürünler bulunmaktadır. Antidiyabetik bitkiler, bağırsak sisteminde glikozun emilmesinde önemli role sahip olan α -amilaz ve α -glukozidaz enzimlerinin inhibe edilmesi ve nişasta gibi karbonhidratların hidrolizinin engellenmesi görevini üstlenmektedirler. α -amilaz enzimi nişastadan oligosakkaritlerin hidrolizini, α -glukozidaz ise glukoza hidroliz görevini üstlenmektedir (Febriyanti ve ark., 2025). Bu özelliğe sahip gıdalar ve o gıdalarla ilgili gerçekleştirilen önemli çalışmalardan kısaca bahsedilecektir.

Dünyada genel olarak diyabete faydası olduğu rapor edilen bitki sayısı kimi kaynakta 800 (Grover ve ark., 2002), kimi kaynakta ise 1050 olarak rapor edilmiştir (Subramoniam, 2016). Yerel çalışmalar ülkemizde antidiyabetik özellik göstermesi nedeniyle halk arasında geleneksel tedavide kullanılan 129 bitki türünü rapor etmiştir (Karaman & Cebe, 2016). Ancak halk arasında geleneksel tedavi amacıyla kullanılan tüm bitkilerin bilimsel çalışmalarla ispatı henüz yapılamamıştır. Bu alanda çalışmaya açık yönler bulunmaktadır.

Antidiyabetik Besinler Ve Konu Hakkında Gerçekleştirilen Bilimsel Çalışmalar

Nar (*Punica granatum L.*)

Nar (*Punica granatum L.*) (Şekil 2) çoğu zaman taze meyve olarak tüketilmektedir. Taze olarak tüketilmeyen nar meyvesi nar suyu, reçel, likör, nar ekşisi gibi farklı ürünlere işlenerek te tüketilmektedir. Nar yetiştiriciliği tropik ve subtropik pek çok ülkede yaygın olarak gerçekleştirilmektedir (Roukas & Kotzekidou, 2020). Nar, yapısında antosiyaninler, flavanoidler, tanenler (ellajik bileşik içeren tanenler, gallik asit, ellajik asit) gibi yüksek biyoaktiviteye sahip bileşikler içermektedir (Jaiswal ve ark., 2010; García-Pastor ve ark., 2020). Bu bileşiklerin antikanserojen, antidiyabetik, antilipidemik, antienflamatuar etki gösterdikleri bildirilmiştir (Yılmaz & Usta, 2010). Aynı şekilde gıda üretim proseslerinde önemli bir nar atığı olan nar kabuğu da fenolik bileşikler, flavanoidler, antosiyaninler, yüksek moleküllü karbonhidratlar ve K, N, Ca, P, Mg, Na gibi önemli mineraller içermektedir (Jurenka, 2008; Bassiri-Jahromi ve ark., 2019).

Şekil 2 Nar Ağacı ve Meyvesi



Kaynak: Şahin, 2026

Narın antidiyabetik özellik gösterdiği literatür çalışmalarıyla ispatlanmıştır.

Günlük 100 mg/kg, 200 mg/kg nar yaprağı, 100 mg/kg, 200 mg/kg nar kabuğu tozu ile diyabetik fareler beslenmiştir. Bu farelerin kan glukoz seviyeleri 1. 7. 14. 28. günlerde fareler aç haldeyken ölçülmüştür. Araştırma sonucunda diyabetik farelerde nar ile ilgili yan ürünlerin antidiyabetik etki gösterdiği ve düşük glisemik indekse sahip oldukları ortaya konmuştur (Salwe ve ark., 2015).

Nar kabuğu ekstraktının antidiyabetik, sitotoksik ve biyoaktif özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, nar kabuğu ekstresinin α -amilaz enzimini % 50 oranında (IC50) inhibe etme gücü 0,76 mg akarboz eşdeğeri/mg ekstrakt, α -glukozidaz enzimini % 50 oranında (IC50) inhibe etme gücü ise $0,81 \pm 0,15$ mg akarboz eşdeğeri/mg ekstrakt olarak belirlenmiştir (Demir ve ark., 2019). Bu çalışmalar bize nar meyvesi ve nar yan ürünlerinin önemli antidiyabetik özellik taşıdığını ortaya koymaktadır.

Nar suyunun çözücü, enzimatik, homojenize etme, total sıvılaştırma gibi farklı yenilikçi yöntemlerle elde edilen nar yan ürünleriyle zenginleştirildiği bir çalışmada en yüksek biyoaktif özellik (Toplam fenolik madde miktarı 938.81 mg GAE/g) gösteren -bu biyoaktif özellikler arasında antidiyabetik özellikte yer alır-örneğin tüm yöntemlerin kombine edildiği yöntem olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada yenilikçi yöntemlerle nar suyu zenginleştirmede yenilikçi yöntemlerin iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır (Aydın, 2024).

Kuşburnu (*Rosa canina L.*)

Rosa genusu, 200'den fazla tür ve 40.000'den fazla alt kültür içermekte, Avrupa, Asya, Orta Doğu ve Kuzey Amerika'nın ılıman ve subtropikal bölgelerinde yaygın olarak bulunmaktadır (Ku & Robertson, 2003). *Rosa canina L.* (kuşburnu), *Rosaceae* familyasına ait bir bitkidir (Şekil 3) ve geleneksel olarak Avrupa ve Akdeniz'de bitkisel tamamlayıcı tıpta kullanılmadığı bildirilmektedir (Gallo, 2022).

Şekil 3 Kuşburnu (*Rosa canina L.*)



Kaynak: Çoban, 2021

Yaygın olarak tüketilen, meyve olarak bilinen kuşburnu yalancı meyvesi, askorbik asit (C vitamini), fenolik asitler, flavonoidler, karotenoidler, tanenler ve mineraller gibi değerli fitokimyasallar açısından zengindir (Chrubasik ve ark., 2008; Liaudanskas ve ark., 2021). Bu bileşikler bitkinin savunma mekanizmalarına katkıda bulunur ve antioksidan, antimikrobiyal, antienflamatuar, antidiyabetik, antikanser ve yaşlanma karşıtı gibi güçlü biyolojik aktivitelerinden sorumludur (Jiménez ve ark., 2016, 2017; Kubczak ve ark., 2020; Zhou ve ark., 2023).

Kuşburnu yalancı meyvelerinin pektin ve selülozik yapılar üzerine etkili enzimlerle hidrolizi yoluyla yaşlanma karşıtı, antidiyabetik ve antimikrobiyal özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada enzimatik yollarla elde edilen ekstraktlarının antidiyabetik özellikler taşıdığı tespit edilmiştir (Lemoni ve ark., 2025).

Gilaburu (*Viburnum opulus*)

Gilaburu (Şekil 4) yöresel olarak gilaburu, girabolu, geleburu gibi farklı isimlerle anılan *Viburnum opulus* latince adına sahip çok yıllık çalimsı formda bir bitkidir. Geleneksel tıpta gilaburu suyu böbrek taşı rahatsızlığında kullanılmaktadır. *V. opulus*, özellikle Orta

ve Batı Karadeniz bölgelerinde hipoglisemik etkileriyle tanınır; çiğ meyvelerinin tüketimi kan şekeri seviyelerinde azalmayla ilişkilendirilmiştir (Sarıkaya & Ü, 2010). Orta Anadolu'da, koyu kırmızı meyveleri geleneksel olarak gilaburu olarak bilinen bir içeceğe işlenir. Son yıllarda, *V. opulus*, zengin fenolik profili ve umut vadeden sağlık yararları nedeniyle bilimsel açıdan ilgi çekmiştir. Buna karşın, *V. lantana*'nın kabuğu, uzun zamandır Türk halk tıbbında kızarıklık giderici ve ağrı kesici etkileri nedeniyle kullanılmaktadır (Baytop, 1999). Önceki fitokimyasal araştırmalar, *V. lantana* ve *V. opulus*'ta iridoidler, iridoid glikozitler, lantanosid, flavonoidler, saponinler, tanenler, arbutin, ursolik asit, flavonlar ve antosiyaninler dahil olmak üzere çeşitli biyoaktif bileşikler tanımlamıştır (Yılmaz ve ark., 2008).

Şekil 4 Gilaburu Bitkisi ve Meyvesi



Bir çalışmada iki farklı gilaburu çeşidinin meyve, yaprak ve dal kısımlarının antidiyabetik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde *V. opulus* türünün α -amilaz enzimini inhibe etme gücü meyvede % 63, dalda % 23,63, yaprakta ise % 0 belirlenmiştir. Araştırmaya konu bir diğerk gilaburu çeşidi olan *V. lantana*'da ise bu değerkler sırasıyla % 96,21, % 34,54, yaprakta % 96,46 tespit edilmiştir. α - glukozidaz enzimini % 50 inhibe edecek konstrasyon değerkleri; *V. opulus* meyve: 498 mg/ml, dal 1046 mg/ml, yaprak 41900 mg/ml, *V. lantana* meyve 71 mg/ml, dal 1033 mg/ml, yaprak ise 37 mg/ml belirlenmiştir.

Kaynakça

- American Diabetes Association. (2017). 2. Classification and Diagnosis of Diabetes: Standards of Medical Care in Diabetes. *Diabetes Care*, 41(Supplement_1), S13-S27. <https://doi.org/10.2337/dc18-S002>
- Arroyave, F., Montaño, D., & Lizcano, F. (2020). Diabetes mellitus is a chronic disease that can benefit from therapy with induced pluripotent stem cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(22), 8685. <https://doi.org/10.3390/ijms21228685>
- Aydın, M. (2024). *Nar Suyu Üretimi Yan Ürünlerinden Yenilikçi Yöntemler İle Elde Edilen Ekstraktların Nar Suyunun Besinsel Olarak Zenginleştirilmesinde Kullanımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Necmettin Erbakan University, Konya.
- Bassiri-Jahromi, S., Doostkam, A., Bassiri-Jahromi, S., & Doostkam, A. (2019). Comparative evaluation of bioactive compounds of various cultivars of pomegranate (*Punica granatum*) in different world regions. *AIMS Agriculture and Food*, 4(1), 41-55. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.1.41>
- Baytop, T. (1999). Therapy with medicinal plants in Turkey (past and present). *Publication of the istanbul University*, 312, 2-3.

- CDC. (2010). *National Chronic Kidney Disease Fact Sheet* [Veri kümesi].
https://dpacmi.org/documents/kidney_Factsheet.pdf. Erişim Tarihi:10.06.2026
- Chrubasik, C., Roufogalis, B. D., Müller-Ladner, U., & Chrubasik, S. (2008). A systematic review on the Rosa canina effect and efficacy profiles. *Phytotherapy Research*, 22(6), 725-733.
<https://doi.org/10.1002/ptr.2400>
- Çoban, E. (2021). Kuşburnu karlı bir yatırım olabilir mi? *Türk Tarım Orman Dergisi*, 62-63.
- Demir, T., Akpınar, Ö., Kara, H., & Güngör, H. (2019). Nar (Punica granatum L.) Kabuğunun İn Vitro Antidiyabetik, Antienflamatuar, Sitotoksik, Antioksidan ve Antimikrobiyal Aktivitesi. *Akademik Gıda*, 17(1), 61-71.
<https://doi.org/10.24323/akademik-gida.544647>
- Febriyanti, R. M., Indradi, R. B., Maisyarah, I. T., Iskandar, Y., Susanti, R. D., & Lestari, D. (2025). Alpha-amylase and Alpha-glucosidase enzymes inhibition and antioxidant potential of selected medicinal plants used as anti-diabetes by Sundanese community in West Java, Indonesia. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 25(1), 426.
<https://doi.org/10.1186/s12906-025-05144-x>

- Galanakis, C. M. (2020). The food systems in the era of the coronavirus (COVID-19) pandemic crisis. *Foods*, 9(4), 523. <https://doi.org/10.3390/foods9040523>
- Gallo, M. (2022). Bioactive Compounds from Various Sources: Beneficial Effects and Technological Applications. *Applied Sciences*, 12(18), 8955. <https://doi.org/10.3390/app12188955>
- García-Pastor, M. E., Serrano, M., Guillén, F., Giménez, M. J., Martínez-Romero, D., Valero, D., & Zapata, P. J. (2020). Preharvest application of methyl jasmonate increases crop yield, fruit quality and bioactive compounds in pomegranate “Mollar de Elche” at harvest and during postharvest storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 145-153. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10007>
- González, P., Lozano, P., Ros, G., & Solano, F. (2023). Hyperglycemia and oxidative stress: An integral, updated and critical overview of their metabolic interconnections. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9352. <https://doi.org/10.3390/ijms24119352>
- Grover, J. K., Yadav, S., & Vats, V. (2002). Medicinal plants of India with anti-diabetic potential. *Journal of Ethnopharmacology*, 81(1), 81-100. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(02\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(02)00059-4)

- Jaiswal, V., DerMarderosian, A., & Porter, J. R. (2010). Anthocyanins and polyphenol oxidase from dried arils of pomegranate (*Punica granatum* L.). *Food Chemistry*, 118(1), 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.095>
- Jiménez, S., Gascón, S., Luquin, A., Laguna, M., Ancin-Azpilicueta, C., & Rodríguez-Yoldi, M. J. (2016). Rosa canina Extracts Have Antiproliferative and Antioxidant Effects on Caco-2 Human Colon Cancer. *PLOS ONE*, 11(7), e0159136. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159136>
- Jiménez, S., Jiménez-Moreno, N., Luquin, A., Laguna, M., Rodríguez-Yoldi, M. J., & Ancín-Azpilicueta, C. (2017). Chemical composition of rosehips from different Rosa species: An alternative source of antioxidants for the food industry. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(7), 1121-1130. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1319071>
- Jurenka, J. S. (2008). Therapeutic applications of pomegranate (*Punica granatum* L.): A review. *Alternative Medicine Review: A Journal of Clinical Therapeutic*, 13(2), 128-144.
- Karaman, Ö., & Cebe, G. E. (2016). Diabetes and antidiabetic plants used in turkey. *Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University*, 40(3), 47-61. https://doi.org/10.1501/Eczfak_0000000588

- Ku, T. C., & Robertson, K. R. (2003). Rosa (Rosaceae). *Flora of China*, 9, 339-381.
- Kubczak, M., Khassenova, A. B., Skalski, B., Michlewska, S., Wielanek, M., Aralbayeva, A. N., Murzakhmetova, M. K., Zamaraeva, M., Skłodowska, M., Bryszewska, M., & Ionov, M. (2020). Bioactive Compounds and Antiradical Activity of the Rosa canina L. Leaf and Twig Extracts. *Agronomy*, 10(12), 1897. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121897>
- Lemoni, Z., Kalantzi, S., Lymperopoulou, T., Tzani, A., Stavropoulos, G., Detsi, A., & Mamma, D. (2025). Optimization of bioactive compounds extraction from Rosa canina L. pseudofruit through the action of two hydrolytic enzyme preparations. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/jctb.70075>
- Li, M., Chi, X., Wang, Y., Setrerrahmane, S., Xie, W., & Xu, H. (2022). Trends in insulin resistance: Insights into mechanisms and therapeutic strategy. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), 216. <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01073-0>
- Liaudanskas, M., Noreikienė, I., Zymonė, K., Juodytė, R., Žvikas, V., & Janulis, V. (2021). Composition and Antioxidant Activity of Phenolic Compounds in Fruit of the Genus Rosa L. *Antioxidants*, 10(4), 545. <https://doi.org/10.3390/antiox10040545>

- Roukas, T., & Kotzekidou, P. (2020). Pomegranate peel waste: A new substrate for citric acid production by *Aspergillus niger* in solid-state fermentation under non-aseptic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 13105-13113. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07928-9>
- Salwe, K. J., Sachdev, D. O., Bahurupi, Y., & Kumarappan, M. (2015). Evaluation of antidiabetic, hypolipemic and antioxidant activity of hydroalcoholic extract of leaves and fruit peel of *Punica granatum* in male Wistar albino rats. *Journal of Natural Science, Biology, and Medicine*, 6(1), 56-62. <https://doi.org/10.4103/0976-9668.149085>
- Sarıkaya, S., & Ü, Ş. Ö. H. H. (2010). Medicinal Plants Used for the Treatment of Diabetes in Turkey. *Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University*, 39(4), 317-342. https://doi.org/10.1501/Eczfak_0000000572
- Subramoniam, A. (2016). *Plants with anti-diabetes mellitus properties*. CRC Press.
- Sun, H., Saeedi, P., Karuranga, S., Pinkepank, M., Ogurtsova, K., Duncan, B. B., Stein, C., Basit, A., Chan, J. C. N., Mbanya, J. C., Pavkov, M. E., Ramachandaran, A., Wild, S. H., James, S., Herman, W. H., Zhang, P., Bommer, C., Kuo, S., Boyko, E. J., & Magliano, D. J. (2022). IDF Diabetes Atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045. *Diabetes Research and*

Clinical Practice, 183, 109119.
<https://doi.org/10.1016/j.diabres.2021.109119>

Şahin, A. (2026). Türk narı kalitesiyle dış pazarda tercih sebebi. *Türk Tarım Orman Dergisi*, 82-84.

WHO. (2026). *Diyabet*. Dünya Sağlık Örgütü.
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>
(Son Erişim Tarihi: 14.06.2026)

Yılmaz, B., & Usta, C. (2010). Nar'ın (*Punica granatum*) terapötik etkileri. *Turkish Journal of Family Practice*, 14(3), 146-153.

Yılmaz, N., Yayli, N., Misir, G., Karaoglu, S., & Yayli, N. (2008). Chemical composition and antimicrobial activities of the essential oils of *Viburnum opulus*, *Viburnum lantana* and *Viburnum orientala*. *Asian Journal of Chemistry*, 20(5), 3324.

Zhou, M., Sun, Y., Luo, L., Pan, H., Zhang, Q., & Yu, C. (2023). Road to a bite of rosehip: A comprehensive review of bioactive compounds, biological activities, and industrial applications of fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 136, 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.006>

BÖLÜM 7

GLUTEN: YAPISI, FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE SAĞLIK ETKİLERİ

MEHMET KÖTEN¹

ALİ MÜCAHİT KARAHAN²

Giriş

Yaklaşık 10.000 yıl önce yerleşik yaşamın başlamasıyla birlikte artan nüfusun beslenme gereksinimi, tarımsal üretimin ortaya çıkışını zorunlu kılmıştır. Arkeolojik ve botanik bulgular, tarımın MÖ 4000 civarında Güneybatı Asya'daki Bereketli Hilal bölgesinde başladığını göstermektedir (Banu ve ark., 2024). Bu dönemde yaygın olarak tüketilen yabani einkorn buğdayı dış kabuğu nedeniyle işlenmesi zor bir tahıl olmuştur (Freeman ve ark., 2013). Zamanla gerçekleştirilen melezleme çalışmaları sonucunda, daha yüksek gluten içeriğine sahip ve öğütülmesi daha kolay buğday çeşitleri geliştirilmiştir. Farklı iklim ve çevre koşullarına uyum sağlayabilen bu yeni çeşitler Anadolu'dan başlayarak geniş

¹ Doç. Dr., Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Orcid: 0000-0002-8232-8610

² Öğr. Gör. Dr., Adıyaman Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, Orcid: 0000-0001-8779-4349

coğrafyalara yayılmıştır (Heun ve ark., 1997). Bu gelişmeler, insan topluluklarının avcı-toplayıcı yaşam biçiminden tarıma dayalı yerleşik toplum yapısına geçişinde belirleyici olmuştur. Buğdayın ıslahına yönelik yapılan çalışmalar; yüksek verim, hastalıklara dayanıklılık ve ekmeklik kalite gibi özelliklerin iyileştirilmesini sağlamıştır. Ancak bu değişimler, buğdayın genetik çeşitliliğini ve potansiyel olarak bağışıklık sistemini uyarıcı (immünojenik) özelliklerini zamanla değiştirmiştir. Bu durumun, çölyak hastalığında görülen antidoku transglutaminaz ve antiendomisyum antikorlarının ortaya çıkışıyla ilişkili olabileceği öne sürülmektedir (Van den Broeck ve ark., 2010; Ludvigsson ve ark., 2014).

Günümüzde küresel buğday üretiminin yaklaşık %95'i, eski tetraploid ve diploid türlerin melezlenmesiyle oluşmuş olan hekzaploid ekmeklik buğdaydır (*Triticum aestivum*) (Kasarda, 2013). Yüksek tane verimi ve uygun teknolojik özellikleri nedeniyle bu tür yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, son yıllarda glutenin endüstriyel gıda üretiminde doku iyileştirici ve protein katkı maddesi olarak kullanımı artış göstermiştir (Dubcovsky ve Dvorak, 2007).

Tahıl tüketimi tarihsel süreçte düzenli bir artış göstermiş; özellikle Dünya Savaşları döneminde üretimin artması bu süreci hızlandırmıştır. Günümüzde yıllık buğday üretimi 700 milyon tonun üzerindedir. Buna paralel olarak gluten maruziyetinin belirgin biçimde artması, bağışıklık sisteminin bu değişime ne ölçüde uyum sağladığı sorusunu gündeme getirmektedir. Her ne kadar bu konuda kesin sonuçlara ulaşmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulsa da, glutenle ilişkili hastalıkların görülme sıklığındaki artış dikkat çekicidir. Bu bağlamda, daha az modifiye edilmiş eski tahıl türlerine yönelmenin veya gluten tüketiminin azaltılmasının olası etkileri bilimsel olarak değerlendirilmeyi gerektirmektedir (Banu ve ark., 2024).

Gluten nedir?

Gluten, buğday, arpa ve çavdar gibi tahıllarda bulunan bir depo proteinidir ve yüksek kaliteli bir bitkisel protein kaynağı olarak kabul edilir. Besin değeri ve fonksiyonel özellikleri nedeniyle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu ve ark., 2026).

Glutenin viskoelastik yapısı, uzayabilirliği ve gaz tutma kapasitesi gibi fonksiyonel özellikleri; onun protein bileşimi, moleküler yapısı ve etkileşim mekanizmaları tarafından belirlenir. Gluten, özellikle fırıncılık ürünlerinde, bitki bazlı gıdalarda (örneğin bitki bazlı et ürünleri, süt alternatifleri ve hayvansal protein ikameleri), et ürünlerinde (bağlayıcı ve doku geliştirici olarak) ve makarna/erişte ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2024a).

Son yıllarda gluten proteinine yönelik araştırmalar, kullanım alanını genişletmek amacıyla emülsifiye etme kapasitesi, çözünürlük ve termal stabilite gibi fonksiyonel özelliklerin optimize edilmesine odaklanmıştır (Pourmohammadi ve Abedi, 2021). Örneğin, glutenin çözünürlüğü; laktilasyon (Li ve ark., 2024), proteaz (alkalin proteaz) ile modifikasyon (Wang ve ark., 2022) veya pH döngüsü uygulaması (Sun ve ark., 2023) yoluyla önemli ölçüde artırılabilir. Ayrıca, ultrasonik işlem ya da deamidasyon uygulamaları sayesinde glutenin yağ ve su tutma kapasitesi de belirgin şekilde iyileştirilebilmektedir (Guo ve ark., 2023; Zhang ve ark., 2024b).

Glutenin gıda endüstrisinde kullanımının artmasıyla birlikte, yol açtığı olumsuz reaksiyonlar da giderek daha fazla dikkat çekmektedir (Cabanillas, 2020). Diğer besinsel proteinlerle karşılaştırıldığında, buğday gluteni sindirime karşı daha dirençlidir ve bu durum birçok alerjik reaksiyona yol açabilmektedir (Scherf, 2019). Glutenle ilişkili bozukluklar başlıca üç gruba ayrılmaktadır: Çölyak hastalığı (celiac disease, CD), buğday alerjisi (wheat allergy,

WA) ve çölyak dışı gluten duyarlılığı (non-celiac gluten sensitivity, NCGS) (Cabanillas, 2020). Çölyak hastalığı (CD), genetik faktörlerle (özellikle HLA-DQ2/DQ8) güçlü şekilde ilişkili otoimmün bir hastalıktır. Bağırsak iltihabı, malabsorpsiyon (besin emilim bozukluğu) ve ince bağırsak villus atrofisine yol açar. Buğday alerjisi (WA) ise çoğunlukla IgE aracılıdır ve gluten kaynaklıdır. Karın ağrısı, ishal ve kusma gibi gastrointestinal belirtilerle kendini gösterir (Faihs ve ark., 2023). Çölyak dışı gluten duyarlılığı (NCGS) için ise günümüzde spesifik bir biyobelirteç bulunmamaktadır. Bu nedenle, çölyak hastalığı ve buğday alerjisi dışlandıktan sonra gluten tüketimini takiben ortaya çıkan gastrointestinal veya bağırsak dışı semptomların varlığı ile tanımlanmaktadır (Siddiqui ve ark., 2022). Mevcut çalışmalar, NCGS'nin altında yatan bağışıklık mekanizmasının daha çok özgül olmayan bağışıklık sisteminin düşük düzeyli aktivasyonu ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu durumda spesifik antikorlar veya bağırsak villus atrofi görülmez (Catassi ve ark., 2024; Stanciu ve ark., 2024). Ayrıca bağırsak mikrobiyotası dengesizliği ve genetik faktörler de NCGS ile ilişkilidir (Catassi ve ark., 2024; Gambino ve ark., 2024).

Günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık %8.4'ünün glutenle ilişkili rahatsızlıklardan etkilendiği ve son yirmi yılda görülme sıklığının iki ile beş kat arttığı bildirilmektedir (Sharma ve ark., 2024). Mevcut tek tedavi yöntemi glutensiz diyetdir. Bu durum, glutensiz ürünlere yönelik pazar talebinin hızla artmasına yol açmıştır. Ancak glutensiz gıdalar; besinsel yetersizlikler ve yaşam kalitesinde azalma gibi önemli sınırlamalara sahiptir (Espinoza-Herrera ve ark., 2021). NCGS ile ilgili araştırma eksiklikleri nedeniyle, potansiyel NCGS hastaları da gastrointestinal rahatsızlıklar yaşamaya devam edebilmektedir (Calabriso ve ark., 2022). Uzun süreli glutensiz beslenme; besin dengesizlikleri ve

yüksek maliyet gibi nedenlerle gluten duyarlılığı olan bireyler için zorlayıcı bir yaşam tarzı oluşturmaktadır. Bu nedenle modifiye edilmiş gluten ürünlerinin geliştirilmesi için gluten modifikasyonuna yönelik araştırmaların derinleştirilmesi acil bir ihtiyaçtır. Olumsuz reaksiyonların şiddetine bağlı olarak farklı azaltma yöntemleri uygulanmaktadır. Şiddetli reaksiyonları olan bireylerde sıkı bir glutensiz diyet semptomların giderilmesinde oldukça etkilidir (Cabanillas, 2020). Bu nedenle glutensiz ürünlerin tekstür, tat ve besin içeriği açısından optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ancak hafif reaksiyon gösteren bireylerin mutlaka glutensiz diyet uygulaması gerekmez. Bu kişilerde özel işlem görmüş gluten içeren gıdaların tüketimi veya sindirim enzim takviyesi ile olumsuz etkiler azaltılabilir (Ido ve ark., 2018). Günümüzde gluten içeren gıdaların alerjenitesini azaltmaya yönelik başlıca stratejiler şunlardır: Enzimatik modifikasyon, fiziksel modifikasyon, mikrobiyal fermantasyon, kimyasal değişiklikler, gen düzenleme teknolojileri (Sharma ve ark., 2024; Jorgensen ve ark., 2024).

Son yıllarda gluten üzerine yapılan araştırmalar özellikle glutensiz gıdalar alanında artış göstermektedir. Glutenin buğday bazlı ürünlerde yaygın olarak bulunması, tamamen kaçınılmasını zorlaştırmaktadır. Daha ciddi belirtiler CD, WA ve NCGS olarak sınıflandırılırken; daha hafif belirtiler sıklıkla sıradan hazımsızlıkla karıştırılmaktadır. NCGS için spesifik biyobelirteçlerin olmaması nedeniyle, kalıcı semptomları olan birçok birey tanı alamamakta; bu durum yaşam kalitesini düşürmekte ve uzun vadede sağlık riskleri oluşturmaktadır (Cabanillas, 2020). Son on yılda gluten araştırmalarındaki odak noktası yapısal özelliklerden fonksiyonel özelliklere doğru kaymıştır. Ayrıca son on yıldaki araştırma eğilimleri ve aralarındaki ilişkiler de gösterilmiştir. Bu bulgular, glutenin fonksiyonelliği ve sağlık etkilerine dayalı araştırmaların

giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir. Bu nedenle glutenin insan gastrointestinal sistemi üzerindeki olumsuz etkilerinin incelenmesi ve bu etkilerin nasıl azaltılabileceğinin araştırılması büyük önem taşımaktadır.

Glutenin Biyokimyasal Yapısı

Gluten proteinleri, doğada bulunan en karmaşık protein agregalarından birini oluşturur. Gelişmiş ayırma prosedürleri ve analitik yöntemler, artık tek tek proteinlerin yapısının ve bunların molekül içi ve moleküller arası bağlarının incelenmesine olanak tanımaktadır. Hem genetik hem de çevresel faktörler ile teknolojik işlemler, gluten proteinlerinin nitel ve nicel bileşimini belirlemektedir (Wieser ve ark., 2023)

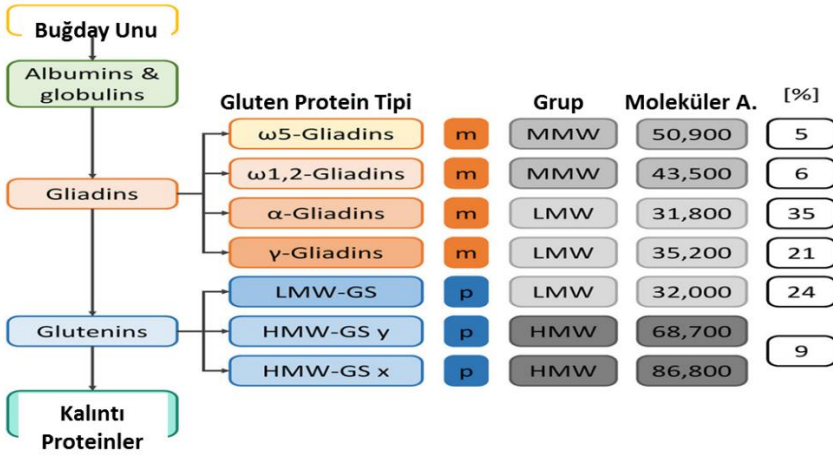
Protein Fraksiyonları

Buğday proteinleri, geleneksel olarak farklı çözünürlük özelliklerine göre Osborne fraksiyonları olarak adlandırılan dört gruba ayrılmıştır: albüminler, globulinler, gliadinler ve gluteninler; ayrıca bir de kalıntı proteinler bulunmaktadır (Şekil 1) (Wieser ve ark., 2023).

Albüminler su ve seyreltilmiş tuz çözeltilerinde çözünürken, globulinler seyreltilmiş tuz çözeltilerinde çözünür ancak suda çözünmezler. Albümin/globulin fraksiyonu, başlıca enzimler ve enzim inhibitörleri gibi düzenleyici, metabolik ve koruyucu proteinleri içermektedir. Gliadinler ise %60 etanol veya %50 propanol gibi sulu alkol çözeltilerinde çözünürken, su ve tuz çözeltilerinde çözünmemektedir. Bunlar monomerik proteinler ve oligomerik proteinler olarak iki alt gruba ayrılmakta olup oligomerik olanlar yüksek molekül ağırlıklı (High Molecular Weight, HMW) gliadinler olarak adlandırılmaktadır (Schmid ve ark., 2016). Doğal polimerik gluteninler, yukarıda belirtilen üç çözücüde çözünmezken disülfid (SS) bağlarının indirgenmesiyle, örneğin ditiotreitol gibi bir

indirgeme ajanı içeren %50 propanol içinde monomerik glutenin alt birimleri (Glutenin Subunit) halinde çözünebilmektedir. Zar proteinleri ve lipoproteinleri de içeren küçük bir protein grubu ise Osborne fraksiyonlarının hiçbirine dahil değildir. Bu proteinler, nişasta ile birlikte Osborne fraksiyonları ekstrakte edildikten sonra çözünmeyen kalıntıda bulunurlar (Wieser, 2007).

Şekil 1. Buğday proteinlerinin farklı fraksiyonlara ve tiplere sınıflandırılması



GS (glutenin subunit): glutenin alt birimleri, HMW (High Molecular Weight): yüksek moleküler ağırlık, LMW (Low Molecular Weight): düşük moleküler ağırlık, m: monomeric, MMW (Medium Molecular Weight): orta moleküler ağırlık, p: polimerik

Gliadinler ve gluteninler, tanenin depo proteinleri olup gluten proteinleri olarak da bilinirler. Yalnızca nişastalı endospermde bulunurlar ve toplam tane proteinlerinin yaklaşık %70–80’ini oluştururlar. Sentezleri bitkilerin çiçeklenmesinden yaklaşık 10 gün sonra başlar ve yaklaşık 20 gün sonra sona erer. Bu proteinler, nişastalı endosperm hücreleri içinde ayrı protein cisimcikleri halinde depolanır. Tane olgunlaşması sırasında bu

protein cisimciklerinin birleşmesiyle gliadinler ve gluteninler, nişasta granüllerinin gömülü olduğu sürekli bir gluten ağı oluştururlar (Tosi, 2012).

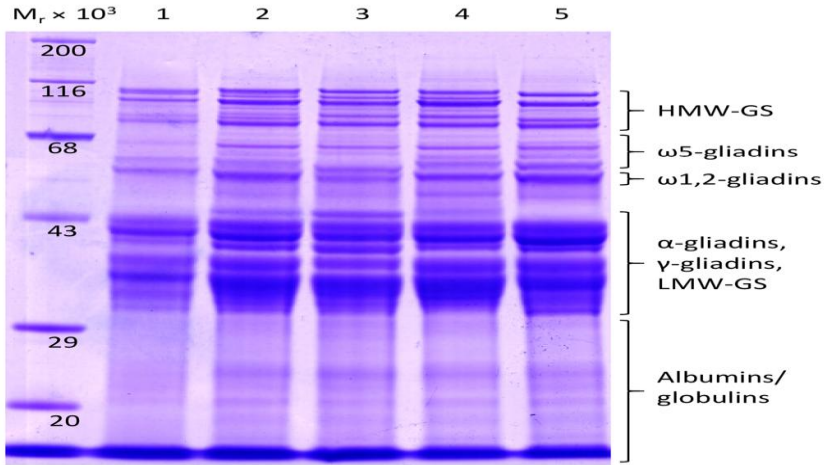
Gluten proteinlerinin başlıca biyolojik işlevi, çimlenme sırasında buğday fidelerine azot, amino asitler ve enerji sağlamaktır. İşleme açısından ise gluten proteinleri, buğdayı ekmek yapımı ve diğer birçok uygulama için benzersiz kılmaktadır. Buğday ununa su eklendiğinde, gliadinler ve gluteninler yoğurma sırasında kohezyonlu ve viskoelastik bir gluten ağı oluştururlar. Bu ağ, hamur fermentasyonu sırasında oluşan gazı tutarak kabarık ve yumuşak bir ekmek iç yapısının oluşmasını sağlar (Delcour ve ark., 2012).

Gluten Protein Tipleri

Gluten proteinleri, amino asit dizilerindeki benzerlik ve farklılıklara göre altı farklı tipe ayrılmaktadır (Şekil 1). Gliadinler, asidik PAGE'deki hareketliliklerine göre α -, γ -, ω 1,2- ve ω 5-gliadinler olarak alt gruplara ayrılırken; gluteninler, sodyum dodesil sülfat–poliakrilamid jel elektroforezi (SDS-PAGE) ile belirlenen molekül ağırlıklarına (MW) göre yüksek molekül ağırlıklı glutenin alt birimleri (HMW-GS) ve düşük molekül ağırlıklı glutenin alt birimleri (LMW-GS) olarak sınıflandırılırlar (Şekil 2). α -gliadinler, γ -gliadinler ve LMW-GS, 260–330 amino asit kalıntısı uzunluğuna sahip olup 28.000–35.000 MW aralığına karşılık gelen düşük molekül ağırlıklı (LMW) gruba dahildir. Orta molekül ağırlıklı (MMW) grup ise yaklaşık 370 amino asit kalıntısı ve 39.000–44.000 MW'a sahip ω 1,2-gliadinler ile yaklaşık 420 amino asit kalıntısı ve 49.000–55.000 MW'a sahip ω 5-gliadinleri içerir. ω tipi gliadinlerin küçük bir kısmı, glutenin bağlı gliadinler (ω b-gliadinler) olarak adlandırılır ve bu proteinler, tek bir amino asit kalıntısının sistein ile yer değiştirmesi sonucu diğer gluten proteinlerine disülfid (SS) bağı ile bağlanır. Bu nedenle ω b-gliadinler glutenin fraksiyonunda yer

alır ve yalnızca SS bağlarının indirgenmesinden sonra çözünebilmektedir. HMW-GS'ler yüksek molekül ağırlıklı gruba aittir ve yaklaşık 800 ve 600 amino asit kalıntısına karşılık gelen sırasıyla 83.000–88.000 ve 67.000–74.000 MW aralıklarına sahip x-tipi ve y-tipi olarak alt sınıflara ayrılırlar (Wieser ve ark., 2023).

Şekil 2. İndirgeyici koşullar altında proteinlerin moleküler ağırlık dağılımını gösteren buğday unu proteinlerinin sodyum dodesil sülfat-poliakrilamid jel elektroforezi



1, Tuareg çeşidi; 2, Soissons, Bezostaya-1, Glenlea, Hereward ve Mv Magvas buğday çeşitlerinin un karışımı; 3, Soissons çeşidi; 4, Glenlea çeşidi; 5, Hereward çeşidi

Gluten protein tipleri, buğday unundan modifiye Osborne fraksiyonlama yöntemi ile gliadin ve glutenin fraksiyonlarının ekstraksiyonu sonrasında, hidrofobikliklerine göre ayırım ve zenginleştirme sağlayan ters faz yüksek performanslı sıvı kromatografisi (RP-HPLC) kullanılarak izole edilebilmektedir (Schalk ve ark., 2017). Ekmeklik buğday unlarından elde edilen HMW-GS, LMW-GS, α-, γ-, ω1,2- ve ω5-gliadin izolatları üzerinde yapılan keşif proteomiği çalışmaları, bu iki aşamalı yöntemin

spesifik protein tiplerini elde etmek için uygun olduğunu göstermiştir; bu izolatlarda gluten proteinleri toplam proteinlerin %58–87’sini oluşturmuştur (Lexhaller ve ark., 2019). Tipe bağlı olarak %2–26 oranında amilaz/tripsin inhibitörleri, <%2–6 oranında avenin benzeri proteinler ve <%2–5 oranında globulinler gibi diğer protein grupları da izolatlarda bulunmuştur. Gluten proteinlerinin daha ayrıntılı incelenmesi, farklı protein tiplerinin birlikte bulunduğunu (ko-mingling) ortaya koymuştur; örneğin α - ve γ -gliadin izolatlarında önemli miktarda LMW-GS tespit edilmiştir. Bu bulgular, gluten proteinlerinin karmaşık yapısını ve diğer proteinler ile un bileşenlerine bağlanabilme yeteneklerini açıkça ortaya koymaktadır (Wieser ve ark., 2023).

Moleküler Yapı

Gluten proteinleri, yalnızca çok sayıda bileşene sahip olmaları ve özgün amino asit dizileriyle değil, aynı zamanda doğal hâllerinde geniş bir molekül ağırlığı dağılımı göstermeleriyle de karakterizedir (Koehler ve Wieser, 2013; Southan ve MacRitchie, 1999). Toplam gluten proteinlerinin yaklaşık %50’sine karşılık gelen monomerik gliadinler (α -, γ - ve ω -gliadinler), yaklaşık 28.000–55.000 MW aralığına sahiptir. Bu proteinler alkolde çözünür; ya disülfid (SS) bağı içermezler (ω -gliadinler) ya da zincir içi SS bağları bulundurlar (α - ve γ -gliadinler). Buna karşılık, gluteninlerin monomerik formu bulunmamaktadır. Monomerlerin yanı sıra, gliadin fraksiyonu 70.000 ile yaklaşık 700.000 MW arasında değişen alkolde çözünür oligomerler de içerir. Bu yapılar, yaklaşık 2–20 protein biriminin zincirler arası SS bağları ile bağlanmasıyla oluşur. Bu alt fraksiyon yüksek molekül ağırlıklı gliadin (HMW-gliadin), agregat gliadin veya etanolde çözünebilen glutenin olarak adlandırılır ve toplam gluten proteinlerinin yaklaşık %15’ini oluşturur (Wieser ve ark., 2023). HMW-gliadin, toplam gliadin ve glutenin fraksiyonlarına kıyasla kimyasal olarak daha az

karakterize edilmiştir. SS bağlarının indirgenmesinden sonra, Almanya’da yetiştirilen “Akteur” buğday çeşidinden izole edilen HMW-gliadinde şu oranlar belirlenmiştir: %48 LMW-GS, %18 γ -gliadin, %13 α -gliadin, %9 ω 1,2-gliadin, %8 HMW-GS ve %4 ω 5-gliadin (Schmid ve ark., 2016). Tek sayıda sistein kalıntısı içeren modifiye gliadinlerin, HMW-GS ve LMW-GS polimerleşmesini durdurarak alkolde çözünebilen oligomerlerin oluşumuna yol açan “zincir sonlandırıcılar” olarak görev yaptığı gösterilmiştir. Un içinde doğal olarak bulunan serbest sistein ve glutatyon da benzer şekilde sonlandırıcı etki göstermektedir (Schmid ve ark., 2017).

Alkolde çözünmeyen glutenin fraksiyonu (toplam gluten proteinlerinin yaklaşık %35’i), esas olarak SS bağları ile bağlı LMW-GS ve HMW-GS’lerden oluşan polimerleri içermekte ve bunların molekül ağırlıkları yaklaşık 700.000’den 10 milyon üzerine kadar uzanmaktadır. “Glutenin makropolimeri” (GMP) veya “ekstrakte edilemeyen polimerik protein” olarak adlandırılan en büyük polimerler, çok milyonlu molekül ağırlık değerlerine sahiptir ve doğadaki en büyük protein agregalarından biri olabilir (Don ve ark., 2003). GMP, glutenin fraksiyonunun sulu SDS çözeltisinde çözünmeyen büyük boyutlu kısmı olarak tanımlanmaktadır. GMP, un içerisindeki diğer bileşenlerin seyreltilmiş SDS çözeltisi (örneğin %1.5) ile ekstraksiyonunu takiben santrifüj ve süpernatantın uzaklaştırılmasıyla elde edilebilmektedir (Wieser ve ark., 2023). Ekmeklik buğday ununda GMP miktarı 20–40 mg/g un (gluten proteinlerinin yaklaşık %3’ü) aralığındadır ve hamur kuvveti ile ekmek hacmiyle ilişkilidir (Thanhaeuser ve ark., 2014). İki buğday çeşidine (Akteur/Winnetou) ait güncel nicel veriler, GMP’nin %54/%50 LMW-GS, %31/%39 HMW-GS ve yaklaşık %10 gliadin içerdiğini göstermiştir. LMW-GS/HMW-GS oranlarının (1.7/1.3), toplam glutenin fraksiyonundaki oranlara (1.9/1.6) göre daha düşük

olması, GMP’de HMW-GS bakımından bir zenginleşme olduğunu göstermektedir (Mueller ve ark., 2016).

Doğal gluteninlerin moleköl ağırlığı dağılımı, hamur özellikleri ve pişirme performansını belirleyen temel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Shewry ve ark., 2003). Dağılım eğrisinin daha yüksek moleköl ağırlıklarına kayması (yani daha yüksek GMP içeriği), karıştırmaya karşı daha dirençli ve daha stabil, daha güçlü bir hamur oluşumuna yol açar. Polimerlerin ortalama uzunluğu arttıkça, birbirleriyle daha fazla örtüşerek nişasta granüllerini çevreleyen sürekli bir yapı oluştururlar. Gluteninlerin MW dağılımını belirleyen başlıca üç faktör bulunmaktadır:

(a) HMW-GS/LMW-GS oranı,

(b) Glu-1 lokuslarındaki allelik varyasyon (örneğin HMW-GS 1Dx5 + 1Dy10 varlığına karşı 1Dx2 + 1Dy12),

(c) Zincir sonlandırıcıların oranı (Lafiandra ve ark., 1999; MacRitchie, 1999).

Disülfid Yapı

Disülfid (SS) bağları, gluten proteinlerinin yapısını belirlemede kilit rol oynamaktadır. Bu bağlar, sistein amino asidinin tiyol (SH-) grupları arasında, ya tek bir protein içinde (zincir içi) ya da birden fazla protein arasında (zincirler arası) oluşmaktadır. Zincir içi bağlar proteinin üçüncül yapısını stabilize ederken, zincirler arası bağlar protein agregatlarının oluşumunu sağlamaktadır. Bu nedenle, düşük oranda bulunmasına rağmen ($\approx$ %2 mol) sistein, gluten proteinlerinin yapısı açısından belirleyicidir. SS bağlarının oluşumu, sistein kalıntıların SH gruplarının oksidasyonu ile ve protein disülfid izomeraz enzimi aracılığıyla, protein sentezinden kısa süre sonra endosperm hücrelerinin endoplazmik retikulum lümeninde başlar ve protein katlanmasının ayrılmaz bir parçasıdır (Osipova ve

ark., 2012). Zincir içi bağların, zincirler arası bağlardan daha hızlı oluştuğu düşünülmektedir. Oksidasyon süreci, sistein kalıntılarının büyük çoğunluğu SS bağlarıyla bağlanana kadar devam etmektedir. SS bağlarının hamur kalitesi üzerindeki önemi, indirgeme ajanlarının eklenmesiyle hamurun zayıflaması ve tiyol bloke edici veya oksitleyici ajanların eklenmesiyle hamurun güçlenmesiyle gösterilebilir (Lagrain ve ark., 2007).

ω -gliadinler çoğunlukla sistein içermez ve ω b-gliadinler dışında monomerik yapıdadır. α - ve γ -gliadinlerin çoğu sırasıyla altı ve sekiz sistein kalıntısı içerir ve üç veya dört homolog zincir içi SS bağı oluşturmaktadır. Bu bağlar α - ile γ -gliadin moleküllerinin kompakt üç boyutlu yapısından sorumludur. Nokta mutasyonları nedeniyle bazı ω -, α - ve γ -gliadinler (“modifiye gliadinler”) tek sayıda sistein içermekte; bu durum, bir SH grubunun serbest kalmasına ve diğer modifiye gliadinler veya gluteninlerle zincirler arası SS bağları oluşturmaya olanak tanımaktadır (Lutz ve ark., 2012).

Glutenin Fizikokimyasal ve Reolojik Özellikleri

Gluten, esas olarak iki ana protein grubundan oluşmaktadır: glutenin (polimerik yapı) ve gliadin (monomerik yapı). Bu proteinler su ile temas ve mekanik işlem (yoğurma) sonucunda birleşerek üç boyutlu viskoelastik bir ağ yapısı oluşturur (Yu ve ark., 2025; Shewry ve ark., 2002).

Gluten proteinleri, glutamin ve prolin bakımından zengin, düşük kompleksiteli ve çoğunlukla intrinsik düzensiz proteinler (IDP) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu durum, proteinlerin belirli bir katı üçüncül yapıdan yoksun olmasını sağlamakta ve esnek, yeniden düzenlenebilir bir ağ oluşumuna imkan tanımaktadır (Mioduszeewski ve Cieplak, 2021).

Glutenin Fizikokimyasal Özellikleri

Moleküler Kompozisyon ve Yapı

Gluten proteinlerinin fizikokimyasal özellikleri, bileşimindeki glutenin ve gliadin oranına bağlıdır. Glutenin, disülfid (S–S) bağları aracılığıyla birbirine bağlanmış yüksek molekül ağırlıklı polimerlerden oluşurken, gliadin daha küçük, tek zincirli proteinlerden oluşmaktadır (Wieser, 2007).

Gluten ağının oluşumunda etkili başlıca etkileşimler şunlardır:

Kovalent bağlar (disülfid bağları): Protein zincirleri arasında kalıcı bağlar oluşturur.

Hidrojen bağları: Özellikle glutamin yan zincirleri aracılığıyla ağ stabilitesine katkı sağlar.

Hidrofobik etkileşimler ve fiziksel dolanma: Zincirler arası bağlanmayı güçlendirir.

Bu etkileşimler sonucunda gluten, megadalton büyüklüğünde makromoleküler kompleksler oluşturabilmektedir (Shewry ve ark., 2002; Mioduszeewski ve Cieplak, 2021).

Su Bağlama Kapasitesi ve Hidratasyon

Gluten proteinleri yüksek su bağlama kapasitesine sahiptir. Su ile etkileşim, protein zincirlerinin açılmasını ve yeni etkileşimlerin oluşmasını sağlamaktadır. Glutenin varlığı, hamurun su absorpsiyonunu, gelişme süresini ve stabilitesini artırmaktadır (Fan ve ark., 2021).

Hidratasyon sürecinde:

- Protein zincirleri genişler,
- Etkileşim yüzeyleri artar,
- Üç boyutlu ağ yapısı oluşur.

Bu süreç, glutenin fonksiyonel özelliklerinin ortaya çıkmasında kritik rol oynamaktadır (Shewry ve ark., 2002).

Gluten Ağı ve Mikro Yapı

Gluten, hamur içinde sürekli bir protein matrisi oluşturarak nişasta granüllerini çevreleyen bir yapı meydana getirmektedir. Bu yapı, mikroskopik ölçekte oldukça kompleks ve çok ölçekli (multi-scale) bir organizasyona sahiptir (Ogawa ve Matsumura, 2021).

Gluten ağının özellikleri:

- Süreklilik (continuous network)
- Gözenekli yapı (porous matrix)
- Dinamik yeniden düzenlenebilirlik

Bu özellikler, glutenin hem mekanik hem de işlevsel davranışını belirlemektedir (Dobraszczyk ve Morgenstern, 2003).

Glutenin Reolojik Özellikleri

Gluten, viskoelastik bir materyaldir; yani hem elastik katı hem de viskoz sıvı özelliklerini birlikte göstermektedir. Bu özellik, glutenin gıda sistemlerinde benzersiz bir yapı oluşturmasını sağlamaktadır (Belton, 1999).

Viskoelastisite

Glutenin viskoelastik davranışı, glutenin ve gliadinin birlikte oluşturduğu sistemden kaynaklanmaktadır:

- Glutenin → elastikiyet sağlar
- Gliadin → viskozite ve akışkanlık sağlar

Glutenin oranının artması, sistemin daha katı ve elastik davranmasına neden olurken, gliadin oranı arttıkça sistem daha akışkan hale gelmektedir (Yu ve ark., 2025).

Elastikiyet ve Dayanıklılık

Glutenin en önemli reolojik özelliği elastikiyettir. Bu özellik sayesinde hamur:

- Deformasyona karşı direnç gösterir
- Şekil değiştirdikten sonra eski haline dönebilir (Belton, 1999).

Bu elastik davranış, disülfid bağları ve moleküler dolanma ile ilişkilidir. Moleküler simülasyon çalışmaları, glutenin zincirlerinin elastik geri kazanımda kritik rol oynadığını göstermektedir (Mioduszewski ve Cieplak, 2021).

Uzayabilirlik (Extensibility)

Gluten sistemi, uygulanan mekanik kuvvet altında uzayabilme ve kopmadan deformasyona uğrayabilme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, özellikle ekmek üretiminde hamurun fermantasyon sırasında oluşan gazı tutabilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Dobraszczyk ve Morgenstern, 2003).

Gliadinler hamurun uzamasını kolaylaştırırken, glutenin elastik yapısı bu uzamayı sınırlamakta ve yapısal bütünlüğü korumaktadır (Wieser, 2007; Belton, 1999). Bu nedenle optimum uzayabilirlik, glutenin ve gliadin arasındaki dengeye bağlıdır.

Uzayabilirliği yüksek hamurlar daha iyi gaz tutma kapasitesi ve daha yüksek ürün hacmi sağlarken, düşük uzayabilirlik hamurun kırılğan olmasına ve düşük hacimli ürün oluşmasına neden olmaktadır (Dobraszczyk ve Morgenstern, 2003).

Reolojik Parametreler

Glutenin reolojik davranışı genellikle aşağıdaki parametrelerle ifade edilir:

- Depolama modülü (G'): Elastik bileşen
- Kayıp modülü (G''): Viskoz bileşen

- $\tan \delta$ (G''/G'): Viskoelastik denge

Enzimatik modifikasyonlar (örneğin transglutaminaz uygulaması), proteinler arası çapraz bağlanmayı artırarak G' ve G'' değerlerini yükseltir ve gluten ağını güçlendirir (Yu ve ark., 2025).

Zaman ve Gerilme Bağımlı Davranış

Gluten, zamana bağlı deformasyon (creep) ve toparlanma (recovery) davranışı gösterir. Ayrıca yüksek deformasyon altında strain hardening (gerilme sertleşmesi) davranışı sergileyebilir. Bu özellikler, glutenin polimer benzeri davranışını yansıtır ve protein ağının yapısal bütünlüğü ile ilişkilidir (Louhichi ve ark., 2022).

Yapı-Fonksiyon İlişkisi

Glutenin fizikokimyasal özellikleri ile reolojik davranışı arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır (Tablo 1). Özellikle glutenin makropolimer yapısı, hamurun işlenebilirliği ve son ürün kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Jiang ve ark., 2026).

Tablo 1. Glutenin fizikokimyasal özellikleri ile reolojik davranışı arasında ilişki

Yapısal Özellik	Reolojik Sonuç
Yüksek molekül ağırlığı	Artan elastikiyet
Disülfid bağ yoğunluğu	Daha güçlü ağ yapısı
Hidrojen bağları	Elastik geri kazanım

Glutensiz Gıda

Glutensiz gıda, en yalın tanımıyla buğday, arpa ve çavdar gibi tahıllarda bulunan gluten proteinini doğal olarak içermeyen ya da özel işlemlerle bu maddeden temizlenmiş yiyecekleri kapsamaktadır. Dünya genelinde kabul gören gıda standartları (Codex Alimentarius) ve Avrupa Birliği yasal düzenlemelerine göre, bir ürünün ambalajında "glutensiz" ifadesinin yer alabilmesi için gluten miktarının kilogram başına en fazla 20 miligram (20 ppm) olması şarttır. Belirlenen bu sınır, çölyak gibi hassasiyeti olan kişilerde bağışıklık sisteminin olumsuz tepki vermesini engelleyen en güvenli seviye olarak yasal koruma altında bulunmaktadır (Espinoza-Herrera ve ark., 2021; Haixi ve ark., 2026; Melini & Melini, 2019).

İnsanların bu gıdaları seçmesinde hem tıbbi nedenler hem de günümüzün yaşam tarzı eğilimleri rol oynamaktadır. Çölyak hastalığı, buğday alerjisi ve çölyak dışı gluten hassasiyeti gibi teşhisleri olanlar için glutensiz beslenme bir tercih değil, ömür boyu uygulanması gereken tek tedavidir (Cabanillas, 2020). Diğer yandan son yıllarda medyanın ve reklamların yönlendirmesiyle bu diyetin bir "sağlıklı yaşam" ya da "zayıflama" yöntemi gibi görülmesi, hiçbir sağlık sorunu bulunmayan milyonlarca kişinin de glutensiz ürünlere yönelmesini sağlamaktadır (Banu ve ark., 2024; Haixi ve ark., 2026).

Bu yüksek talebe karşılık, glutensiz gıda üretmek özellikle fırıncılık alanında ciddi zorluklar doğurmaktadır. Standart bir hamurda gluten, suyla birleştğinde esnek ve güçlü bir bağ oluşturmaktadır. Bu bağ, mayalanma sırasında açığa çıkan gazı tutarak ekmeğin kabarmasını, süngerimsi ve yumuşak bir doku

kazanmasını sağlamaktadır (Gasparre & Rosell, 2023). Glutenin bu bir arada tutucu özelliği olmadığında hamur esnekliğini yitirmekte ve şekil almayan akışkan bir sıvı hâline gelmektedir. Bu yapısal eksiklik yüzünden glutensiz ekmekler genelde az kabarmakta, sert olmakta, ağızda ufalanmakta ve çok çabuk bayatlamaktadır. Ayrıca bu yapısal kusurları kapatıp kıvam yakalayabilmek için ürünlere genellikle saf nişasta, fazla yağ ve şeker eklenmektedir; bu durum da glutensiz ürünlerin normal ekmeklere göre protein, lif ve vitamin yönünden daha zayıf kalmasına neden olmaktadır (Espinoza-Herrera ve ark., 2021; Haixi ve ark., 2026; Melini & Melini, 2019).

Gıda bilimi, gluten olmadığında çöken bu yapıyı yeniden kurmak ve ürünleri daha besleyici hâle getirmek için farklı yöntemler uygulamaktadır. İlk olarak, sadece mısır veya pirinç nişastasını kullanmak yerine; kinoa, amarant, karabuğday gibi besin değeri yüksek yalancı tahıllar ile nohut, mercimek ve bezelye gibi protein yönünden zengin baklagillerin unları hamur karışımlarına eklenmektedir. Glutenin o esnek ve yapışkan dokusunu taklit edebilmek için de ksantan sakızı ve guar sakızı gibi doğal bitkisel kıvam artırıcılardan yararlanılmaktadır. Yapıyı daha da güçlendirmek amacıyla transglutaminaz gibi enzimler kullanılarak hamurdaki diğer proteinlerin birbirine bağlanması ve böylece yapay bir bağ oluşturulması sağlanmaktadır (Dong ve ark., 2024; Gasparre & Rosell, 2023; Haixi ve ark., 2026; Perea-Escobar ve ark., 2025).

Bu zorlukların üstesinden gelmek için sadece malzeme içeriğini değiştirmekle kalmayıp modern üretim teknolojilerinden de yararlanılmaktadır. Glutensiz hamurun hem tadını iyileştirmek hem de tazeliğini daha uzun süre korumasını sağlamak amacıyla, özel laktik asit bakterileriyle hazırlanan ekşi maya yöntemleri kullanılmaktadır. Pişirme aşamasında ise dışının yanıp içinin hamur kalmasına yol açan eski yöntemler yerine, hamurun her yerinin aynı anda ve hızla pişmesini sağlayan, böylece ekmeğin sönmesini

önleyen ohmik ısıtma (elektrik akımıyla pişirme) veya mikrodalga gibi yeni teknolojiler tercih edilmektedir (Haixi ve ark., 2026). Kullanılan bu yeni malzemeler ve gelişmiş teknolojiler sayesinde, glutensiz ürünlerin kalitesi ve lezzeti her geçen gün normal buğday ekmeklerine daha da yaklaşmaktadır.

Glutenin Yeni Fonksiyonel Özellikler için Modifikasyonu

Buğdayın işlenmesi sırasında elde edilen gluten, gıda sektöründe çok özel bir protein olsa da doğal yapısıyla suya karşı dirençlidir ve çözünmesi oldukça zordur. Gluten modifikasyonu en basit anlatımıyla, bu dirençli proteinin moleküler yapısını ve bağlarını çeşitli yöntemlerle esneterek, kırarak veya yeniden şekillendirerek ona yeni ve kullanışlı özellikler kazandırma sürecini ifade etmektedir (Abedi & Pourmohammadi, 2020; Zhang ve ark., 2023).

Bu işlemlerin yapılmasındaki temel amaç, glutenin normalde çok düşük olan suda çözünme kabiliyetini artırmak; su ile yağı bir arada tutma, köpürme ve jel oluşturma gibi özelliklerini geliştirmektir. Aynı zamanda çölyak hastalığı ya da buğday alerjisi gibi rahatsızlıkları tetikleyen alerjik kısımları parçalayarak gluteni sağlık açısından daha güvenli bir hâle getirmek ve gıda dışındaki doğa dostu endüstriyel ürünlerin imalatında kullanılabilir kılmak da hedeflenmektedir (Di Stasio & Mamone, 2025; Li ve ark., 2024; Zheng ve ark., 2026).

Glutenin gıda ve sanayi alanlarındaki kullanımını yaygınlaştırmak, suda çözünürlüğünü artırmak ve alerjik etkilerini azaltmak amacıyla başvuru alan modifikasyon yöntemleri; fiziksel, kimyasal, enzimatik ve genetik olmak üzere dört ana başlık altında toplanmaktadır.

Fiziksel Modifikasyonlar: Bu yöntemler, proteine dışarıdan herhangi bir kimyasal madde ilave etmeden, yalnızca ısı ve mekanik

güç kullanılarak yapının değiştirilmesi esasına dayanmaktadır. Çevre ve tüketici sağlığı yönünden en güvenilir yaklaşımlar olarak kabul edilmektedir (Abedi & Pourmohammadi, 2020). Temel amaç, birbiriyle sıkıca birleşmiş protein bağlarını çözmek, yapıyı esnetmek ve glutenin suyla daha kolay bütünleşmesini sağlamaktadır. Sıklıkla başvurulan uygulamalar arasında yüksek yoğunluklu ultrason dalgaları, ultra yüksek basınç (UHP), mikrodalga ve ekstrüzyon (ısı ile yoğurmanın birlikte kullanıldığı pişirme) işlemleri yer almaktadır (Liu ve ark., 2021; Song ve ark., 2025). Örneğin, dondurma ve çözme aşamaları büyük proteinleri parçalayarak hamurun dengesini etkilerken; ultra yüksek basınç ve bilyalı öğütme işlemleri proteinlerin fiziksel boyutunu küçülterek suda çözünmelerini kolaylaştırmaktadır (Abedi & Pourmohammadi, 2020; Zhang ve ark., 2023).

Kimyasal Modifikasyonlar: Sanayi ölçeğinde oldukça hızlı, ekonomik ve kesin sonuçlar veren bu işlemler, gluten proteininin elektrik yükünü asit, baz veya çeşitli tuzlar yardımıyla değiştirmeyi hedeflemektedir. Proteine uygulanan en yaygın kimyasal yöntemler; deamidasyon, fosforilasyon, asilasyon ve glikozilasyon (Maillard reaksiyonu) işlemleridir (Abedi & Pourmohammadi, 2021). Örneğin, hafif asitlerin tercih edildiği deamidasyon işleminde glutenin elektrik yükü artırılmaktadır; bu da proteinin suyu bir sünger gibi çekmesine ve daha güçlü köpükler oluşturmaya imkân tanımaktadır (Dong ve ark., 2024). Polifosfatların kullanıldığı fosforilasyon işlemi de glutenin su tutma yeteneğini ciddi oranda artırmaktadır (Hu ve ark., 2022). Ancak bu yöntemlerin besin değerini düşürebilme (bazı temel amino asitleri yok etme) ve zararlı yan ürünler oluşturabilme riski taşıması, gıda güvenliği açısından çok dikkatli kullanılmalarını gerektirmektedir (Zhang ve ark., 2023).

Enzimatik Modifikasyonlar: Kimyasal yöntemlerin barındırdığı sağlık risklerini ortadan kaldıran, oldukça güvenli ve doğrudan amaca yönelik uygulamalardır. Bu grupta, doğada bulunan çeşitli enzimlerden yararlanılarak proteinin yapısı yeniden şekillendirilmektedir (Espinoza-Herrera ve ark., 2021). İşlemler genellikle iki farklı mantıkla yürütülmektedir. Birinci yaklaşımda alkalaz veya papain gibi "proteaz" enzimleri kullanılarak glutenin uzun bağları küçük parçalara bölünmektedir. Bu sayede hem proteinin suda çözünürlüğü artmakta hem de insan vücudundaki alerjik reaksiyonları tetikleyen kısımlar parçalanmaktadır (Li ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2023). İkinci yaklaşımda ise "transglutaminaz (TGase)" gibi enzimlerden yararlanılarak protein iplikçikleri arasında yeni ve güçlü bağlar kurulmaktadır. Bu işlem gluteni parçalamamakta, aksine hamurun esnekliğini ve dokusunu güçlendirmektedir (Dong ve ark., 2024).

Genetik Modifikasyonlar: Bu yöntem, gluten modifikasyonunu mutfakta ya da fabrikada değil, doğrudan tarlada ve tohum aşamasında gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Çölyak hastalığını veya buğday alerjisini tetikleyen zararlı protein dizilimlerinin (özellikle gliadin bileşenlerinin) oluşumunu durdurmak amacıyla buğdayın genetik yapısına müdahale edilmektedir (Di Stasio & Mamone, 2025). Geleneksel bitki ıslahı (melezleme) yöntemlerinin yanı sıra, günümüzde RNA interferans (RNAi) ve CRISPR/Cas9 gibi ileri gen düzenleme teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde, hamurun kabarması için gereken teknik özellikleri koruyan ancak bağışıklık sistemini olumsuz etkilemeyen, insan sağlığına çok daha uygun yeni buğday türleri yetiştirilebilmektedir (Asri ve ark., 2021; Espinoza-Herrera ve ark., 2021).

Farklı yöntemlerle modifiye edilen bu gluten, günümüzde oldukça geniş bir uygulama alanına kavuşmuştur. Gıda sektöründe

bitkisel et alternatiflerinin (vegan et) üretilmesinde, vitamin ve antioksidan gibi hassas maddelerin vücuda güvenle taşınmasını sağlayan mikro kapsüllerin yapımında ve glutensiz gıdalarda eksik olan esnek bağ dokusunun taklit edilmesinde bu malzemeden yararlanılmaktadır (Espinoza-Herrera ve ark., 2021; Zhang ve ark., 2023). Gıda sanayisinin dışında ise doğada kendiliğinden yok olabilen çevre dostu ambalaj filmlerinin ve ahşap sektörü için kimyasal içermeyen doğal yapıştırıcıların imalatında önemli bir rol oynamaktadır (Mousavi & Safaei-Ghomi, 2026; Xu & Li, 2023).

Elbette her yöntemin kendine göre belirgin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Kimyasal modifikasyonlar son derece hızlı, ekonomik ve etkilidir; ancak reaksiyon sırasında zararlı yan ürünlerin oluşma riski taşıması ya da lisin gibi temel yapı taşlarına zarar vererek proteinin besin değerini düşürmesi, gıda güvenliği açısından soru işaretleri yaratmaktadır (Abedi & Pourmohammadi, 2021). Fiziksel modifikasyonlar sağlığa zararsız ve temiz bir süreç olarak kabul edilse de, genellikle özel ve maliyetli endüstriyel makinelere ya da yüksek enerjiye ihtiyaç duymaktadır; ayrıca etkileri kimyasal yöntemler kadar keskin olmayabilmektedir (Abedi & Pourmohammadi, 2020; Li ve ark., 2024). Enzimatik yöntemler ise hem tüketici sağlığı yönünden oldukça güvenli hem de doğrudan hedefe yöneliktir, fakat bu süreçte kullanılan enzimlerin maliyetinin yüksek olması, üretim aşamalarında karşılaşılan en büyük dezavantajı oluşturmaktadır (Zhang ve ark., 2023).

Gluten Proteininin Sağlık Üzerine Etkileri

Dünya Sağlık Örgütüne (DSÖ) göre sağlıklı bir diyet; yetersiz ya da aşırı beslenmenin yol açacağı sorunların yanı sıra diyabet, kalp rahatsızlıkları ve inme gibi bulaşıcı olmayan hastalıklara karşı da koruyucu olmalıdır (Melini & Melini, 2019). Ancak modern yaşam şartları ve değişen beslenme alışkanlıkları,

genel sağlık üzerinde yeni zorlukları beraberinde getirmektedir. Dünya genelinde artış gösteren gıda alerjileri ile intoleranslar, belirli besin maddelerine karşı bağışıklık veya sindirim sisteminde olumsuz tepkilere neden olmakta; bu durum kişileri, rahatsızlığı tetikleyen unsurların beslenme düzeninden tamamen çıkarıldığđı özel diyetler uygulamaya mecbur bırakmaktadır (Cabanillas, 2020).

Bu doğrultuda "gluten", belirli besin bileşenlerine bağlı olarak gelişen sağlık sorunlarının ve zorunlu diyet kısıtlamalarının en belirgin örneklerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Dünya nüfusunun yüksek enerji ihtiyacını ve tüketim talebini karşılamada buğday, pirinç ve mısır gibi temel tahıllar küresel gıda arzının merkezinde yer almaktadır (Asri ve ark., 2021). Özellikle buğday; ekonomik olması, farklı coğrafiyalarda kolayca üretilebilmesi ve suyla karıştırıldığında hamura gaz tutma, kabarma ve kendine has bir esneklik kazandırması sebebiyle dünya genelinde en fazla tüketilen gıda kaynaklarının başında gelmektedir (Wieser ve ark., 2023). Buğdayın fırıncılık alanında çok önemli görülen bu yapısal özelliklerini sağlayan temel unsur ise yapısındaki depo proteini olan glutendir (Zhang ve ark., 2023).

Normal koşullarda gıda sektörü için oldukça işlevsel olan gluten proteini, genetik veya bağışıklık sistemi yönünden hassas kişilerde ise modern beslenme düzeninin en çok tartışılan bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. Gluten, herhangi bir genetik yatkınlığđı ya da hassasiyeti bulunmayan sağlıklı bireylerde olumlu ve koruyucu etkiler gösterirken; genetik olarak duyarlı kişilerde ise ciddi bağışıklık sistemi hastalıklarına (çölyak hastalığđı, buğday alerjisi ve çölyak dışı gluten hassasiyeti) yol açabilmektedir (Di Stasio & Mamone, 2025).

Sağlıklı Bireylerde Glutenin Olumlu ve Koruyucu Etkileri

Doğal Tansiyon Düşürücü ve Antioksidan Etki: Gluten proteinleri mide ve bağırsaklarda sindirilirken, "biyoaktif peptitler" olarak adlandırılan küçük, aktif protein parçacıkları açığa çıkmaktadır (Di Stasio & Mamone, 2025). Bu minik parçacıklar, vücuttaki hücre hasarını hızlandıran zararlı maddeleri temizleyerek güçlü bir antioksidan görevi üstlenmektedir. Ayrıca, tıpkı tansiyon ilaçlarının çalışma mekanizmasında olduğu gibi belirli enzimleri dengeleyerek (ACE enzimini baskılayarak) kan basıncının, yani tansiyonun güvenli seviyelerde kalmasına yardımcı olmaktadır (Di Stasio & Mamone, 2025; Zhang ve ark., 2023).

Kalp ve Damar Sağlığının Korunması: Toplumdaki genel yanlışlığın aksine, gluten tüketimi kalp hastalıklarına neden olmamaktadır. On binlerce sağlıklı kişinin uzun yıllar boyunca takip edildiği kapsamlı araştırmalar, glutenli besinlerin (özellikle tam tahılların) tüketilmesinin koroner kalp hastalığı riskini düşürebileceğini ortaya koymaktadır (Lebwohl ve ark., 2017). Ayrıca glutenin kandaki yağ dengesini düzenleyici bir etkisi bulunmaktadır; yüksek oranda gluten içeren bir beslenme düzeni, kandaki trigliserit ve "kötü kolesterol" (LDL) seviyelerini belirgin bir şekilde düşürerek damar sağlığını desteklemektedir (Zong ve ark., 2018).

Tip 2 Diyabet (Şeker Hastalığı) Riskini Düşürmesi: Yüz binlerce kişinin incelendiği kapsamlı çalışmalar, beslenme düzeninde daha fazla glutene yer veren bireylerin Tip 2 diyabet hastalığına yakalanma riskinin daha düşük olduğunu göstermektedir (Zong ve ark., 2018). Gluten barındıran tam tahıllı gıdalar, aynı zamanda kan şekerini dengeleyen ve diyabete karşı koruma sağlayan "tahıl lifleri" yönünden oldukça zengindir. Gluteni beslenmesinden tamamen çıkaran kişiler bu koruyucu liflerden de uzak kaldıkları için farkında olmadan şeker hastalığına daha yatkın hâle gelebilmektedir (Banu ve ark., 2024; Zong ve ark., 2018).

Bağıışıklık Sistemini ve Hücreleri Beslemesi: Gluten, "glutamin" adı verilen amino asit yönünden doğadaki en zengin kaynaklar arasında yer almaktadır, glutenin yaklaşık %40'ı bu maddeden meydana gelmektedir (Zhang ve ark., 2023). Glutamin, vücuttaki hücreler için önemli bir enerji kaynağıdır. Özellikle vücut strese girdiğinde, hastalandığında ya da bir travma (yara, ameliyat vb.) yaşandığında, bağışıklık sistemi ve bağırsak hücreleri işlevlerini sürdürebilmek için yüksek miktarda glutamine ihtiyaç duymaktadır (Banu ve ark., 2024).

Obezite ve Beslenme Yetersizliklerinden Koruma: Herhangi bir sağlık sorunu bulunmayan kişilerin popüler akımlara kapılarak "glutensiz diyet" yönelmesi lif, demir, çinko, kalsiyum ve B vitaminleri (örneğin folik asit) gibi yaşamsal besin öğelerinden uzak kalmalarına yol açmaktadır (Banu ve ark., 2024). Üstelik marketlerde yer alan paketlenmiş glutensiz ürünler, glutenin eksikliğini kapatabilmek, ürüne lezzet ve kıvam kazandırabilmek için genellikle daha fazla katkı maddesi, doymuş yağ ve şeker içermektedir. Bu nedenle doğal yollarla gluten (tam tahıl) tüketmek, kişiyi daha doyurucu, besleyici ve dengeli bir beslenme düzeninde tutarak kilo alımından ve metabolik rahatsızlıklardan korumaktadır (Melini & Melini, 2019).

Tıbbi bir teşhis konmadığı müddetçe sağlıklı bireylerin glutenden uzak durmasına gerek yoktur. Gluten, tam tahıllı ve dengeli bir diyetin parçası olarak tüketildiğinde kalp sağlığını koruyan, diyabet riskini düşüren ve bağışıklığı destekleyen değerli bir besin bileşenidir.

Hassas Bireylerde Toksik Tetikleyici Olarak Gluten (Gluten İlişkili Bozukluklar)

İnsanlığın binlerce yıldır tükettiği temel bir besin kaynağı olan buğdayın içindeki gluten proteini, bazı kişilerin vücudunda

istenmeyen ve bazen de oldukça şiddetli tepkilere yol açabilmektedir. Bağıışıklık sisteminin gluteni algılama biçimine göre değışen ve klinik olarak birbirinden farklılaşan bu rahatsızlıklar bütünü, tıp dünyasında "Gluten İlişkili Bozukluklar" başlığı altında toplanmaktadır (Sapone ve ark., 2012).

Çölyak Hastalığı

Çölyak hastalığı, genetik yatkınlığı olan bireylerde buğday, arpa ve çavdar gibi tahıllarda yer alan gluten proteininin tüketilmesiyle tetiklenen, ömür boyu süren otoimmün bir bağırsak rahatsızlığıdır (Cabanillas, 2020; Di Stasio & Mamone, 2025). Dünya genelinde yaklaşık her yüz kişiden birini etkileyen bu durum, basit bir gıda intoleransından ya da alerjiden çok daha karmaşık bir hücresel hasar sürecini ifade etmektedir. Hastalığın yapısını tam olarak kavrayabilmek için insan metabolizmasındaki işleyişine, bağırsaklarda yarattığı tahribata ve bu durumla nasıl mücadele edilmesi gerektiğine yakından bakmak gerekmektedir.

Normal koşullarda tüketilen gıdalar mide ve bağırsak enzimleri tarafından en küçük yapı taşlarına kadar parçalanmaktadır. Ancak glutenin oldukça dirençli ve zorlu bir kimyasal yapısı bulunmaktadır. Özellikle yapısındaki prolin ve glutamin amino asitlerinin fazlalığı nedeniyle insan sindirim enzimleri gluteni tamamen sindirememekte ve bunun sonucunda bağırsak boşluğunda büyük, parçalanmaya karşı koyan protein parçacıkları kalmaktadır (Di Stasio & Mamone, 2025). Sağlıklı bir insanda bu durum herhangi bir sorun yaratmazken, çölyak hastalığına genetik yatkınlığı olan, yani HLA-DQ2 veya HLA-DQ8 genlerini taşıyan kişilerde bu sindirilemeyen yapılar savunma sistemini harekete geçirmektedir. Gluten peptitleri, bağırsak hücreleri arasındaki sıkı bağları açan zonulin adlı bir proteini aşırı uyarak bağırsak duvarının geçirgenliğini artırmakta ve bu büyük parçalar bağırsak

astarının altına sızmaktadır (Caio ve ark., 2020; Sapone ve ark., 2012). Bağırsak dokusunun altına geçen bu maddeler, burada vücudun kendi enzimi olan doku transglutaminazı ile reaksiyona girerek kimyasal bir değişime uğramaktadır. Bağırsaklık sistemi bu değişen yapıları doğrudan bir tehdit olarak algılayarak alarm durumuna geçmekte ve bölgeye akın eden savunma hücreleri şiddetli bir iltihaplanma süreci başlatmaktadır (Di Stasio & Mamone, 2025). Bu sürecin ortasında kalan ince bağırsak yüzeyi ağır hasar görmekte; besinlerin emilmesini sağlayan ve parmaklı çıkıntılar olarak bilinen villuslar eriyerek düzleşmektedir (Asri ve ark., 2021).

Bağırsak yüzeyindeki bu emilim noktalarının düzleşmesi, vücudun tüketilen gıdalardaki vitamin, mineral ve temel besinleri kan dolaşımına alamaması anlamına gelmektedir. Hastalık her yaşta ortaya çıkabilmekte ve kişiden kişiye çok farklı belirtiler gösterebilmektedir. Vücut besinleri sindiremediği için kronik ishal, kötü kokulu ve yağlı dışkılama, şiddetli karın ağrısı, aşırı gaz, şişkinlik ve kilo kaybı en sık karşılaşılan şikayetler arasındadır. Çocuklarda bu durum özellikle boy uzamasında duraklama ve büyüme geriliği ile kendini belli etmektedir (Banu ve ark., 2024; Cabanillas, 2020). Bağırsak yeterli emilim yapamadığı için demir ve folik asit eksikliğine bağlı derin bir kansızlık, D vitamini ile kalsiyum emilemediği için kemik erimesi veya diş minesini bozuklukları ortaya çıkmaktadır (Kıran Taşçı & Esen, 2026; Melini & Melini, 2019). Ayrıca sürekli bir yorgunluk hâli, kadınlarda adet düzensizlikleri ya da kısırlık görülebilmektedir. Çölyak bazen hiç karın ağrısı yapmadan, diz ve dirseklerde şiddetli kaşıntılı su toplayan döküntülerle veya beyinciği etkileyerek denge kaybına yol açan nörolojik sorunlarla da belirebilmektedir (Asri ve ark., 2021). Hatta bazı vakalar hiçbir belirti vermezken, bağırsak hasarı içten içe devam etmektedir (Sapone ve ark., 2012).

Günümüz tıp dünyasında çölyak hastalığını ilaçla tamamen iyileştiren ya da ameliyatla düzelten tıbbi bir yöntem henüz bulunmamaktadır. Hastalığın bilinen tek ve zorunlu tedavisi, ömür boyu sürecek çok sıkı bir glutensiz diyet uygulamaktır (Banu ve ark., 2024; Catassi ve ark., 2024). Bu diyetle buğday, arpa ve çavdar hayatın her alanından tamamen çıkarılmalıdır. Ekmek, makarna, pasta gibi belirgin gıdaların ötesinde sosis, hazır çorbalar, salata sosları, hatta bazı ilaçların içeriğinde dahi gizli gluten bulunabileceğinden hastaların iyi birer etiket okuyucusu olması gerekmektedir (Lebwohl ve ark., 2017). Evde aynı kesme tahtasının, aynı ekmek kızartma makinesinin veya aynı kızartma yağının kullanılması bile glutenin sağlıklı gıdaya bulaşmasına yeterek bağırsaktaki hasarı tekrar başlatabilmektedir (Di Stasio & Mamone, 2025). Ancak glutensiz diyeti sürdürmek sadece marketten hazır glutensiz ürünleri almak anlamına gelmemektedir. Endüstriyel glutensiz ürünler, hamurun kıvamını tutturabilmek için genellikle normal ürünlere göre daha fazla şeker ve doymuş yağ içerirken; lif, demir ve B vitaminleri yönünden oldukça zayıftır (Melini & Melini, 2019). Bu durum, zaten emilim bozukluğu yaşayan hastaları obezite, kolesterol ve diyabet gibi yeni metabolik risklerle karşı karşıya bırakabileceği için beslenmenin doğal alternatifler, taze sebze, meyve ve temiz protein kaynaklarıyla desteklenmesi önem taşımaktadır. Teşhis aşamasında boşalan depoları doldurmak için hekimler genellikle D vitamini, kalsiyum ve demir takviyeleri başlatmaktadır (Kıran Taşcı & Esen, 2026). Gelecekte hastaların diyet yükünü hafifletmek adına, yanlışlıkla alınan gluteni midede zararsız hâle getirecek enzim hapları, bağırsak geçirgenliğini engelleyen ilaçlar veya bağışıklık sistemini eğiten aşılar üzerinde klinik çalışmalar sürse de, bunlar onaylanana kadar sıkı diyet disiplini tek çözümdür (Banu ve ark., 2024; Cabanillas, 2020).

Buğday Alerjisi

Buğday alerjisi, bağışıklık sisteminin buğdayda bulunan ve aslında vücut için tamamen zararsız olan proteinlere karşı saniyeler veya dakikalar içinde aşırı bir savunma tepkisi göstermesidir. Toplumda sıklıkla çölyak hastalığıyla aynı kefeye konulsa da bu iki rahatsızlık hem hücresel düzeyde hem de klinik yansımaları bakımından birbirinden tamamen farklı mekanizmalara sahiptir. Çölyak hastalığı, genetik olarak yatkın bireylerde sadece glutene karşı gelişen, yavaş ilerleyen ve ince bağırsak dokusunu tahrip ederek emilim fırçalarını (villusları) eriten otoimmün bir süreçtir. Buğday alerjisinde ise herhangi bir genetik zorunluluk (HLA-DQ2 veya DQ8 genleri) aranmaz ve bağışıklık sistemi sadece glutene değil, buğdayın içindeki albümin ve globulin gibi suda çözünebilen pek çok farklı proteine de klasik bir gıda alerjisi tepkisi vermektedir. En önemlisi, buğday alerjisi bağırsaklarda kalıcı bir doku erimesi veya mimari bozukluk bırakmamaktadır (Cárdenas-Torres ve ark., 2021; Roszkowska ve ark., 2019).

İnsan metabolizmasındaki işleyişinde, sürecin merkezinde vücutun yabancı maddelere karşı ürettiği İmmünoglobulin E (IgE) antikorları yer almaktadır. Duyarlı bir kişi buğday içeren bir besin tükettiğinde, un tozunu soluduğunda veya tenine temas ettiğinde, bağışıklık sistemi bu proteinleri tehlikeli birer işgalci olarak kodlamaktadır. Vücutta önceden hazır bekleyen IgE antikorları buğday proteinleri ile birleşerek çapraz bağlar kurmakta ve savunma hattının en önündeki mast hücreleri ile bazofilleri uyarmaktadır. Bu hücresel uyarılma, hücrelerin hızla parçalanmasına ve kana çok yüksek miktarda histamin başta olmak üzere çeşitli iltihap yapıcı kimyasalların salgılanmasına neden olmaktadır (Bardella ve ark., 2016; Catassi ve ark., 2024).

Kana aniden karışan histaminin etkisiyle belirtiler son derece hızlı bir şekilde, genellikle dakikalar ile birkaç saat içinde patlak vermektedir. Vücutun farklı sistemlerini aynı anda etkileyebilen bu

reaksiyonlar ciltte şiddetli kaşıntı, kurdeşen (ürtiker) ve özellikle yüz çevresinde şişme (anjiyoödem) şeklinde kendini göstermektedir. Sindirim sisteminde bulantı, şiddetli karın krampları ve kusma görülürken; solunum yollarında nefes darlığı, tıkanma ve fırıncıların ortamdaki un tozunu solumasıyla gelişen mesleki astım tabloları ortaya çıkmaktadır. Hastalığın en tehlikeli klinik tablosu ise, kana karışan kimyasalların tansiyonu aniden düşürmesiyle gelişen ve müdahale edilmezse hayati tehlike yaratan sistemik anafilaktik şoktur. Ayrıca buğdayın içindeki "omega-5 gliadin" adlı spesifik bir proteine karşı gelişen çok özel bir alerji türünde, kişi buğdaylı bir gıda yendikten hemen sonra egzersiz yaparsa bağırsak geçirgenliğinin artmasıyla ani ve ölümcül bir şok (WDEIA) geçirebilmektedir (Asri ve ark., 2021; Bardella ve ark., 2016).

Günümüzde buğday alerjisini tamamen ortadan kaldıran standart bir ilaç tedavisi bulunmadığından, hastalığın temel yönetimi buğdayın ve tüm buğday proteinlerinin beslenmeden sıfır toleransla çıkarıldığı katı bir "buğdaysız diyet" uygulamasıdır (Cabanillas, 2020; Di Stasio & Mamone, 2025). Hastaların gizli buğday içerebilecek paketli gıdalara ve çapraz bulaşma risklerine karşı etiket okuma alışkanlığı kazanması şarttır; yanlışlıkla maruz kalma durumlarında gelişen hafif reaksiyonlar için hekim onayıyla antihistaminikler kullanılabilirken, hayati tehlike yaratan anafilaktik şok riski taşıyan hastaların yanlarında mutlaka adrenalin (epinefrin) oto-enjektörü bulundurmaları kritik bir zorunluluktur (Banu ve ark., 2024). Geleceğe yönelik umut verici araştırmalar arasında bağışıklık sistemini düşük dozlarla buğdaya alıştırmayı hedefleyen ağız yoluyla duyarsızlaştırma (immünoterapi) yöntemleri, probiyotik destekleri ve gıda teknolojisiyle alerjenik yapısı parçalanmış hipoalerjenik buğday ürünlerinin geliştirilmesi yer alsa da, bu alternatifler henüz rutin klinik kullanıma girmemiştir (Cabanillas, 2020; Catassi ve ark., 2024).

Çölyak Dışı Gluten Hassasiyeti

Çölyak dışı gluten hassasiyeti, kişinin çölyak hastalığı veya buğday alerjisi olmamasına rağmen gluten içeren gıdalar tükettiğinde ortaya çıkan ve bu yiyeceklerin beslenme düzeninden çıkarılmasıyla düzelen bir rahatsızlıktır (Siddiqui ve ark., 2022). Bu tablo, otoimmün ya da IgE aracılı klasik bir alerjik tepki olmamakla birlikte, bağırsaklarda kalıcı doku hasarı (villus erimesi) bırakmamasıyla çölyak hastalığından net bir şekilde ayrılmaktadır (Volta ve ark., 2013). Kişinin genetik yatkınlığı (HLA-DQ2 veya DQ8 genleri) çölyaktaki kadar belirleyici değildir; ancak doğal bağışıklık sisteminin glutene ve buğdayın içindeki diğer bileşenlere karşı verdiği anormal hücrel yanıt hastalığın temelini oluşturmaktadır (Cárdenas-Torres ve ark., 2021).

Kişi gluten veya buğdaylı bir besin tükettikten saatler ya da birkaç gün sonra oldukça geniş bir şikayet yelpazesıyla karşılaşmaktadır. Bağırsaklarda şişkinlik, karın ağrısı ve ishal gibi huzursuz bağırsak sendromunu andıran sorunların yanı sıra; kronik yorgunluk, zihin bulanıklığı (beyin sisi), baş ve eklem ağrıları, kas ağrıları ve cilt döküntüleri gibi bağırsak dışı belirtiler de sıklıkla görülmektedir (Caio ve ark., 2020; Cárdenas-Torres ve ark., 2021). Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu şikayetlerin tek sorumlusunun gluten olmadığını açıkça göstermektedir. Buğdayın içinde bulunan ve doğal bağışıklık sistemini tetikleyen amilaz-tripsin inhibitörleri (ATI'ler) ile bağırsaklarda fermente olarak gaz ve şişkinliğe yol açan FODMAP adı verilen karbonhidratların da bu tabloyu büyük ölçüde tetiklediği kanıtlanmıştır (Gibson ve ark., 2017; Henggeler ve ark., 2017). Tıp dünyasında bu durumun adının sadece gluteni değil, tüm bu tetikleyicileri kapsayacak şekilde "çölyak dışı buğday hassasiyeti" olarak değiştirilmesi bu sebeple sıkça tartışılmaktadır.

Hastalığı kesin olarak kanıtlayacak spesifik bir kan testi veya biyobelirteç henüz bulunmamaktadır. Vakaların yaklaşık yarısında kanda IgG sınıfı anti-gliadin antikorları (AGA) saptansa da, bu test tek başına kesin tanı koydurucu bir özellik taşımamaktadır (Volta ve ark., 2013). Bu nedenle tanı, ancak çölyak hastalığının ve buğday alerjisinin tıbbi testlerle (antikor ve biyopsi) kesin olarak dışlanması ardından konulabilen bir "dışlama tanısıdır" (Siddiqui ve ark., 2022). Güncel klinik yaklaşımlarda, özellikle "Salerno Uzman Kriterleri" referans alınarak, hastanın glutensiz diyetle verdiği yanıt değerlendirilmektedir. Ardından, tanıyı kesinleştirmek ve psikolojik beklentiden kaynaklı "nosebo" etkisini ekarte etmek için hekim kontrolünde çift kör plasebo kontrollü gluten yükleme testleri uygulanmaktadır (Cárdenas-Torres ve ark., 2021; Roszkowska ve ark., 2019).

Tedavi süreci, rahatsızlığı tetikleyen buğday, arpa, çavdar gibi tahılların ve bazen de FODMAP içeren diğer gıdaların beslenmeden çıkarılmasına dayanmaktadır (Cárdenas-Torres ve ark., 2021). Ancak çölyak hastalığındaki sıfır toleranslı ve ömür boyu süren diyet mecburiyetinin aksine, bu hassasiyete sahip kişilerin bağırsak bariyerleri toparlandıktan sonra zamanla gluteni tolere edebilme ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenle hekimler genellikle bir veya iki yıllık sıkı bir diyetin ardından, hastanın tolerans eşiğini değerlendirmek için kademeli olarak glutenin diyetle tekrar eklenmesini önerebilmektedir (Roszkowska ve ark., 2019; Volta ve ark., 2013).

Tıbbi Gereklik Dışında "Glutensiz Diyet" Uygulamasının Riskleri

Son yıllarda çölyak hastalığı, buğday alerjisi ya da gluten hassasiyeti gibi herhangi bir tıbbi tanısı bulunmayan pek çok kişi, daha sağlıklı bir yaşam sürmek veya kilo vermek amacıyla glutensiz

diyete yönelmektedir. Popüler diyet kültürünün bir parçası hâline gelen bu eğilimin aksine, tıbbi bir zorunluluk olmadan gluteni hayattan çıkarmak faydadan çok zarar getirebilmektedir. Bilimsel veriler, sağlıklı bireylerin bu diyeti uygulamasının vücutta ciddi beslenme yetersizliklerine, metabolik sorunlara ve yaşam kalitesini düşüren psikolojik yüklere neden olabileceğini açıkça göstermektedir (Cabanillas, 2020; Zong ve ark., 2018).

Glutensiz diyetin en belirgin riski, yarattığı derin besin ögesi eksiklikleridir. Market raflarında yer alan ticari glutensiz ürünler, buğdayın sunduğu esneklik, kıvam ve lezzeti taklit edebilmek amacıyla normal eşdeğerlerine göre çok daha yüksek oranlarda doymuş yağ, şeker ve sodyum (tuz) içermektedir; buna karşılık protein ve diyet lifi açısından oldukça fakirdir (Banu ve ark., 2024; Melini & Melini, 2019). Buğday ve diğer glutenli tahıllar B vitaminleri (özellikle folik asit, tiamin, riboflavin), demir, çinko ve magnezyum gibi hayati mikro besinlerin temel kaynağını oluşturmaktadır. Bu tahılların beslenmeden tamamen çıkarılması, bireyleri yorgunluk, derin kansızlık ve kemik erimesi gibi ciddi sağlık problemleriyle karşı karşıya bırakabilmektedir (Cárdenas-Torres ve ark., 2021).

Beslenme dengesindeki bu bozulma, uzun vadede metabolik ve kardiyovasküler hastalıklara da zemin hazırlamaktadır. Tam tahıllar kalp damar sağlığını koruyan ve kan şekerini dengeleyen en önemli besin gruplarındandır. Sağlıklı bireylerin gluteni bırakması, genellikle bu koruyucu tam tahılların ve liflerin de beslenmeden çıkması anlamına gelmektedir. Bu kayıp, koroner kalp hastalığı ile Tip 2 diyabet riskini belirgin şekilde artırmaktadır (Lebwohl ve ark., 2017; Zong ve ark., 2018). Üstelik, glisemik indeksi (kan şekerini yükseltme hızı) oldukça yüksek olan pirinç veya mısır nişastası bazlı glutensiz ürünlerin sürekli tüketimi, insülin direncini tetikleyerek

kilo alımına, obeziteye ve metabolik sendrom gelişimine yol açabilmektedir (Melini & Melini, 2019; Mozzillo ve ark., 2022).

Tıbbi gereklilik dışı glutensiz beslenmenin göz ardı edilen bir diğer etkisi ise bağırsak florası (mikrobiyota) üzerindeki olumsuz yansımalarıdır. Buğday, bağırsaklardaki dost bakterileri besleyen prebiyotik lifler açısından oldukça zengindir. Glutensiz diyetle geçildiğinde, bağırsaktaki *Bifidobacterium* ve *Lactobacillus* gibi faydalı bakteri türlerinin sayısı hızla azalırken, fırsatçı ve zararlı bakterilerin popülasyonu artmaya başlamaktadır (Caio ve ark., 2020). Disbiyozis olarak adlandırılan bu dengesizlik durumu, bağışıklık sisteminin zayıflamasına ve bağırsak bariyerinin bozulmasına neden olarak hastalıklara karşı vücut direncini düşürmektedir.

Fiziksel sağlık risklerinin yanı sıra, bu diyetin getirdiği ekonomik ve psikososyal yükler de oldukça ağırdır. Glutensiz ürünler, geleneksel muadillerine göre çok daha pahalıdır ve her zaman kolayca bulunamamaktadır; bu da bütçe üzerinde ciddi bir baskı ve gıda güvensizliği oluşturmaktadır (Al-sunaïd ve ark., 2021). Ayrıca dışarıda yemek yeme, sosyal etkinliklere katılma veya seyahat etme gibi günlük rutinler sürekli bir kaygı, etiket okuma takıntısı ve kısıtlama kaynağına dönüşerek kişiyi sosyal izolasyona sürükleyebilir (Cabanillas, 2020; Lebowhl ve ark., 2015). Hastalık tanısı olmaksızın sadece daha sağlıklı olma beklentisiyle glutensiz beslenmek, hem bedensel dengeleri bozan hem de ruhsal bütünlüğü tehdit eden riskli bir girişimdir.

Sonuç

Gluten, buğday, arpa ve çavdar gibi tahıllarda bulunan ve özellikle hamur yapısına esneklik ve dayanıklılık kazandıran önemli bir proteindir. Viskoelastik yapısı sayesinde ekmek ve diğer fırıncılık ürünlerinde kaliteli bir doku ve hacim oluşmasını sağlar.

Bu nedenle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak gluten, bazı bireylerde sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Çölyak hastalığı, buğday alerjisi ve çölyak dışı gluten duyarlılığı gibi rahatsızlıklar gluten tüketimiyle ilişkilidir ve yaşam kalitesini olumsuz etkileyebilir. Günümüzde bu durumlar için en etkili yöntem glutensiz diyetdir. Ancak, glutensiz ürünler besin değeri, maliyet ve doku açısından bazı dezavantajlara sahiptir. Özellikle hafif semptomları olan bireylerde katı bir glutensiz diyet uygulamak, hem sağlık hem de yaşam kalitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu nedenle modifiye edilmiş gluten, alerjeniteyi azaltırken besin değerini koruyabilmesi sayesinde uzun vadeli ve sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda araştırmalar, gluteni tamamen ortadan kaldırmak yerine, alerjen etkisini azaltırken teknolojik özelliklerini korumaya odaklanmıştır. Enzimatik, fiziksel ve biyoteknolojik yöntemlerle glutenin daha güvenli hale getirilmesi hedeflenmektedir. Endüstriyel ölçekte modifiye gluten uygulamaları henüz sınırlıdır. Enzimatik modifikasyon ve genetik mühendislik, güvenli ve “temiz etiket” özellikleri nedeniyle en umut verici yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Özellikle enzimatik modifikasyonun fiziksel yöntemlerle birlikte uygulanması; yüksek verimlilik, hassasiyet ve ılımlı işlem koşulları sağlayarak gluten alerjenitesini en üst düzeyde azaltma potansiyeline sahiptir. Ön işlem aşamasında fiziksel modifikasyonun kullanılması, hem alerjenitenin daha etkili azaltılmasına hem de glutenin temel fonksiyonel özelliklerinin mümkün olduğunca korunmasına katkı sağlamaktadır.

Alerjenite ile fonksiyonel özellikler arasındaki dengeyi sağlamak için, diyet lifi ve mikrobiyal polisakkaritler gibi yeni protein dışı yapılandırıcı bileşenler de geliştirilebilir. Bu bileşenler; yüksek su tutma kapasitesi, kendi kendine jel oluşturma özellikleri

ve proteinlerle etkileşim yetenekleri sayesinde modifiye gluten ile birlikte yeni kompozit kolloidal ağ yapıları oluşturabilir. Böylece elastikiyet, gaz tutma ve nem tutma özelliklerindeki kayıplar telafi edilerek hem düşük alerjenite hem de istenen fonksiyonel özellikler aynı anda sağlanabilir. Bu yaklaşım, modifiye gluten ürünlerinin endüstriyel uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Sonuç olarak gluten, hem gıda teknolojisi hem de insan sağlığı açısından önemli bir bileşendir. Gelecekte yapılacak çalışmalarla, alerjen etkisi azaltılmış ve fonksiyonel özellikleri korunmuş gluten ürünlerinin geliştirilmesi mümkün olabilir.

Kaynakça

- Abedi, E., & Pourmohammadi, K. (2020). Physical modifications of wheat gluten protein: An extensive review. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11), e13619. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13619>
- Abedi, E., & Pourmohammadi, K. (2021). Chemical modifications and their effects on gluten protein: An extensive review. *Food Chemistry*, 343, 128398. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128398>
- Al-sunaïd, F. F., Al-homidi, M. M., Al-qahtani, R. M., Al-ashwal, R. A., Mudhish, G. A., Hanbazaza, M. A., & Al-zaben, A. S. (2021). The influence of a gluten-free diet on health-related quality of life in individuals with celiac disease. *BMC Gastroenterology*, 21, 330. <https://doi.org/10.1186/s12876-021-01908-0>
- Asri, N., Rostami-Nejad, M., Anderson, R. P., & Rostami, K. (2021). The Gluten Gene: Unlocking the Understanding of Gluten Sensitivity and Intolerance. *The Application of Clinical Genetics*, 14, 37-50. <http://doi.org/10.2147/TACG.S276596>
- Banu, Z., Somraj, B., Geetha, A., Khan, A.A., Srinu, B., Vamshi, J., Karunakar, J., Saïdaiah, P. (2024). A comprehensive review of biochemical, functional, and dietary implications of Gluten. *Annals of Phytomedicine*, 13(1), 196-208. <http://doi.org/10.54085/ap.2024.13.1.19>
- Bardella, M. T., Elli, L., & Ferretti, F. (2016). Non-celiac gluten sensitivity. *Current Gastroenterology Reports*, 18(12), 63. <https://doi.org/10.1007/s11894-016-0536-7>

- Belton, P.S. (1999). On the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science*, 29(2), 103-107. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1998.0227>
- Cabanillas, B. (2020). Gluten-related disorders: celiac disease, wheat allergy, and nonceliac gluten sensitivity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2606-2621. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651689>
- Caio, G., Lungaro, L., Segata, N., Guarino, M., Zoli, G., Volta, U., & De Giorgio, R. (2020). Effect of Gluten-Free Diet on Gut Microbiota Composition in Patients with Celiac Disease and Non-Celiac Gluten/Wheat Sensitivity. *Nutrients*, 12, 1832. <https://doi.org/10.3390/nu12061832>
- Calabriso, N., Scoditti, E., Massaro, M., Maffia, M., Chieppa, M., Laddomada, B., Carluccio, M.A. (2022). Non-celiac gluten sensitivity and protective role of dietary polyphenols. *Nutrients*, 14(13), 2679. <https://doi.org/10.3390/nu14132679>
- Cárdenas-Torres, F. I., Cabrera-Chávez, F., Figueroa-Salcido, O. G., & Ontiveros, N. (2021). Non-celiac gluten sensitivity: An update. *Medicina*, 57(6), 526. <https://doi.org/10.3390/medicina57060526>
- Catassi, G., Lener, E., Grattagliano, M.M., Motuz, S., Zavarella, M.A., Bibbo, S., Cammarota, G., Gasbarrini, A., Ianiro, G., Catassi, C. (2024). The role of microbiome in the development of gluten-related disorders. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 72, 101951. <https://doi.org/10.1016/j.bpg.2024.101951>
- Delcour, J. A., Joye, I. J., Pareyt, B., Wilderjans, E., Brijs, K., Lagrain, B. (2012). Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products. *Annual Review of*

- Food Science and Technology*, 3, 469-492.
<https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101303>
- Di Stasio, L., & Mamone, G. (2025). Gluten proteins: Beneficial factors and toxic triggers in human health. *Foods*, 14(19), 3403. <https://doi.org/10.3390/foods14193403>
- Dobraszczyk, B.J., Morgenstern, M.P. (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 229-245. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00059-6](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00059-6)
- Don, C., Lichtendonk, W., Plijter, J.J., Hamer, R.J. (2003). Glutenin macropolymer: A gel formed by glutenin particles. *Journal of Cereal Science*, 37(1), 1-7. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2002.0481>
- Dong, M., Sun, Y., Xiong, D., Song, Q., Jia, J., Liu, X., Sheng, L., & Duan, X. (2024). Comparison of the effects of pH-shifting, acetic acid modification, and TGase treatment on the physicochemical and functional properties of wheat gluten protein. *Food and Bioprocess Technology*, 17(1), 245–256. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03130-0>
- Dubcovsky, J., Dvorak, J. (2007). Genome plasticity a key factor in the success of polyploid wheat under domestication. *Science*, 316(5833), 1862-1866. <https://doi.org/10.1126/science.1143986>
- Espinoza-Herrera, J., Martínez, L.M., Serna-Saldivar, S.O., Chack-Hernandez, C. (2021). Methods for the modification and evaluation of cereal proteins for the substitution of wheat gluten in dough systems. *Foods*, 10(1), 118. <https://doi.org/10.3390/foods10010118>
- Faihs, V., Kugler, C., Schmalhofer, V., Scherf, K.A., Lexhaller, B., Mortz, C.G., Bindeslev-Jensen, C., Biedermann, T., Brockow,

- K. (2023). Wheat-dependent exercise-induced anaphylaxis: subtypes, diagnosis, and management. *Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, 21(10), 1131-1135. <https://doi.org/10.1111/ddg.15162>
- Fan, J.L., Han, N., Chen, H.O. (2021). Physicochemical and structural properties of wheat gluten/rice starch dough-like model. *Journal of Cereal Science*, 98, 103181. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103181>
- Freeman, H. (2013). The neolithic revolution and subsequent emergence of the celiac affection. *International Journal of Celiac Disease*, 1(1), 19-22. <http://doi.org/10.12691/ijcd-1-1-8>
- Gambino, C.M., Agnello, L., Vidali, M., Lo Sasso, B., Mansueto, P., Seidita, A., Giuliano, A., Scazzone, C., Massa, D., Masucci, A., Tamburello, M., Vassallo, R., Ciaccio, A.M., Candore, G., Carroccio, A., Ciaccio, M. (2024). The role of killer immunoglobulin-like receptors (KIRs) in the genetic susceptibility to non-celiac wheat sensitivity (NCWS). *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 62(9), 1814-1823. <http://doi.org/10.1515/cclm-2024-0034>
- Gasparre, N., & Rosell, C. M. (2023). Wheat gluten: A functional protein still challenging to replace in gluten-free cereal-based foods. *Cereal Chemistry*, 100(1), 243-255. <https://doi.org/10.1002/cche.10624>
- Gibson, P. R., Skodje, G. I., & Lundin, K. E. A. (2017). Non-coeliac gluten sensitivity. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 32(S1), 86-89. <https://doi.org/10.1111/jgh.13705>

- Guo, Z., Zhang, H., Chen, K., Wang, Z., Chen, G., Yang, B., Kan, J. (2023). Characterization of sonicated gluten protein and subsequent rheological properties of model dough and noodles. *Journal of the Science Food and Agriculture*, 103(2), 799-810. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12191>
- Haixi, L., Ahmed, S., Shahbaz, M., Abid, J., Jahangir, M., & Khan, S. (2026). Quality improvement in gluten-free bread: A comprehensive review of modern techniques and ingredients. *Food Reviews International*, 42(3), 3055-3078. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2537966>
- Henggeler, J. C., Veríssimo, M., & Ramos, F. (2017). Non-coeliac gluten sensitivity: A review of the literature. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.018>
- Heun, M., Schafer-Preg, R., Klawan, D., Castagna, R., Accerbi, M., Borghi, B., Salamini, F. (1997). Site of Einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting. *Science*, 278 (5341): 1312-1314. <http://www.jstor.org/stable/2894198>
- Hu, F., Zou, P.-R., Zhang, F., Thakur, K., Khan, M. R., Busquets, R., Zhang, J.-G., & Wei, Z. J. (2022). Wheat gluten proteins phosphorylated with sodium tripolyphosphate: Changes in structure to improve functional properties for expanding applications. *Current Research in Food Science*, 5, 1342–1351. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.08.014>
- Ido, H., Matsubara, H., Kuroda, M., Takahashi, A., Kojima, Y., Koikeda, S., Sasaki, M. (2018). Combination of gluten-digesting enzymes improved symptoms of non-celiac gluten sensitivity: a randomized single-blind, placebo-controlled crossover study. *Clinical and Translational*

Gastroenterology, 9(9), 181. <https://doi.org/10.1038/s41424-018-0052-1>

- Jiang, Z., Zhang, T., Guan, E., Qu, Z., Zhang, L., Zhang, Y., Zhou, H., Yu, J. (2026). Physicochemical properties and multi-scale structures of glutenin macropolymer gel across wheat cultivars. *Food Hydrocolloids*, 178, 112649. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2026.112649>
- Jorgensen, R., Arul Arasan, T.S., Srkalovic, M.B., Van Antwerp, C., Ng, P.K.W, Gangur, V. (2024). Glutenin from the ancient wheat progenitor is intrinsically allergenic as it can clinically sensitize mice for systemic anaphylaxis by activating Th2 immune pathway. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 7324. <https://doi.org/10.3390/ijms25137324>
- Kasarda, D.D. (2013). Can an increase in celiac disease be attributed to an increase in the gluten content of wheat as a consequence of wheat breeding. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(6), 1155-1159. <https://doi.org/10.1021/jf305122s>
- Kıran Taşcı, E., & Esen, S. (2026). Managing bone health in pediatric celiac disease: Effects of a gluten-free diet and calcium-vitamin D therapy. *The Journal of Pediatric Research*, 13(1), 40-45. <https://doi.org/10.4274/jpr.galenos.2025.29895>
- Koehler, P., Wieser, H. (2013). Chemistry of cereal grains. In M. Gobbetti & M. Ganzle (Eds.), *Handbook of Sourdough Biotechnology* (1st ed., pp. 11-45). Springer.

- Lafiandra, D., Masci, S., Blumenthal, C., Wrigley, C. W. (1999). The formation of glutenin polymer in practice. *Cereal Foods World*, 44, 572-578.
- Lagrain, B., Thewissen, B. G., Brijs, K., Delcour, J. A. (2007). Impact of redox agents on the extractability of gluten proteins during bread making. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(13), 5320-5325. <https://doi.org/10.1021/jf070639n>
- Lebwohl, B., Ludvigsson, J. F., & Green, P. H. R. (2015). Celiac disease and non-celiac gluten sensitivity. *BMJ*, 351, h4347. <https://doi.org/10.1136/bmj.h4347>
- Lebwohl, B., Cao, Y., Zong, G., Hu, F. B., Green, P. H. R., Neugut, A. I., Rimm, E. B., Sampson, L., Dougherty, L. W., Giovannucci, E., Willett, W. C., Sun, Q., & Chan, A. T. (2017). Long term gluten consumption in adults without celiac disease and risk of coronary heart disease: Prospective cohort study. *BMJ*, 357, j1892. <https://doi.org/10.1136/bmj.j1892>
- Lexhaller, B., Tompos, C., Scherf, K. A. (2017). Fundamental study on reactivities of gluten protein types from wheat, rye and barley with five sandwich ELISA test kits. *Food Chemistry*, 237, 320-330. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.121>
- Li, W., Zhou, Q., Xu, J., Zhu, S., Lv, S., Yu, Z., Yang, Y., Liu, Y., Zhou, Y., Sui, X., Zhang, Q., Xiao, Y. (2024). Insight into the solubilization mechanism of wheat gluten by protease modification from conformational change and molecular interaction perspective. *Food Chemistry*, 447, 138992. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138992>

- Liu, Z., Zheng, Z., Zhu, G., Luo, S., Zhang, D., Liu, F., & Shen, Y. (2021). Modification of the structural and functional properties of wheat gluten protein using a planetary ball mill. *Food Chemistry*, 363, 130251. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130251>
- Liu, L., Yang, H., Zhang, Q., Chen, X., Wang, Y., Shen, Q., Ding, W. (2026). Gluten composition, modification, and applications in gluten-free food: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 346, 150625. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.150625>
- Louhichi, A., Morel, M.H., Ramos, L., Banc, A. (2022). Flow of gluten with tunable protein composition: from stress undershoot to stress overshoot and strain hardening. *Physics of Fluids*, 34, 051906. <https://doi.org/10.1063/5.0089744>
- Ludvigsson, J., Bai, J., Biagi, F. ve ark. (2014). Diagnosis and management of adult coeliac disease: Guidelines from the British society of Gastroenterology. *Gut*, 63(8), 1210-1228. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2013-306578>
- Lutz, E., Wieser, H., Koehler, P. (2012). Identification of disulfide bonds in wheat gluten proteins by means of mass spectrometry/electron transfer dissociation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(14), 3708-3716. <https://doi.org/10.1021/jf204973u>
- MacRitchie, F. (1999). Wheat proteins. *Cereal Foods World*, 44, 188-193.
- Melini, V., & Melini, F. (2019). Gluten-free diet: Gaps and needs for a healthier diet. *Nutrients*, 11(1), 170. <https://doi.org/10.3390/nu11010170>

- Mioduszewski L., Cieplak M. (2021). Viscoelastic properties of wheat gluten in a molecular dynamics study. *PLOS Computational Biology*, 17(3), e1008840. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008840>
- Mousavi, A., & Safaei-Ghomi, J. (2026). Comparative physical evaluation of adhesive properties in modified gluten. *Results in Surfaces and Interfaces*, 23, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2026.100752>
- Mozzillo, E., Franceschi, R., Di Candia, F., Rosanio, F. M., Leonardi, L., Fedi, L., Rosà, V., Cauvin, V., Franzese, A., & Marcovecchio, M. L. (2022). The impact of gluten-free diet on growth, metabolic control and quality of life in youth with type 1 diabetes and celiac disease: A systematic review. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 191, 110032. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2022.110032>
- Mueller, E., Wieser, H., Koehler, P. (2016). Preparation and chemical characterization of glutenin macropolymer (GMP) gel. *Journal of Cereal Science*, 70, 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.05.021>
- Ogawa, T., Matsumura, Y. (2021). Revealing 3D structure of gluten in wheat dough by optical clearing imaging. *Nature Communications*, 12, 1708. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22019-0>
- Osipova, S. V., Permyakova, M. D., Permyakov, A. V. (2012). Role of non-prolamins proteins and low molecular weight redox agents in protein folding and polymerization in wheat grains and influence on baking quality parameters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(49), 12065-12073. <https://doi.org/10.1021/jf303513m>

- Perea-Escobar, C. D., Londoño-Hernández, L., Benavente-Valdés, J. R., Balagurusamy, N., Contreras Esquivel, J. C., & Hernández-Almanza, A. Y. (2025). Incorporation of protein alternatives in bakery products: Biological value and techno-functional properties. *Applied Sciences*, 15(20), 11279. <https://doi.org/10.3390/app152011279>
- Pourmohammadi, K., Abedi, E. (2021). Hydrolytic enzymes and their directly and indirectly effects on gluten and dough properties: an extensive review. *Food Science & Nutrition*, 9(7), 3988-4006. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2344>
- Roszkowska, A., Pawlicka, M., Mroczek, A., Bałabuszek, K., & Nieradko-Iwanicka, B. (2019). Non-celiac gluten sensitivity: A review. *Medicina*, 55(6), 222. <https://doi.org/10.3390/medicina55060222>
- Sapone, A., Bai, J. C., Ciacci, C., Dolinsek, J., Green, P. H. R., Hadjivassiliou, M., Kaukinen, K., Rostami, K., Sanders, D. S., Schumann, M., Ullrich, R., Villalta, D., Volta, U., Catassi, C., & Fasano, A. (2012). Spectrum of gluten-related disorders: consensus on new nomenclature and classification. *BMC Medicine*, 10, 13. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-10-13>
- Schalk, K., Lexhaller, B., Koehler, P., Scherf, K. A. (2017). Isolation and characterization of gluten protein types from wheat, rye, barley and oats for use as reference materials. *PLOS One*, 12(2), e0172819. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172819>
- Scherf, K.A. (2019). Immunoreactive cereal proteins in wheat allergy, non-celiac gluten/wheat sensitivity (NCGS) and celiac disease. *Current Opinion in Food Science*, 25, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.02.003>

- Schmid, M., Wieser, H., Koehler, P. (2016). Isolation and characterization of high-molecular-weight (HMW) gliadins from wheat flour. *Cereal Chemistry*, 93(6), 536-542. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-04-16-0078-R>
- Schmid, M., Wieser, H., Koehler, P. (2017). Disulphide structure of high-molecular-weight (HMW-) gliadins as affected by terminators. *Journal of Cereal Science*, 78, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.12.007>
- Sharma, L., Rahman, F., Sharma, R.A. (2024). The emerging role of biotechnological advances and artificial intelligence in tackling gluten sensitivity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(23), 4566-4582. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2392158>
- Shewry, P.R., Halford, N.G., Belton, P.S., Tatham, A.S. (2002). The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 357(1418), 133-142. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.1024>
- Shewry, P. R., Halford, N. G., Tatham, A. S., Popineau, Y., Lafandra, D., Belton, P. S. (2003). The high molecular weight subunits of wheat glutenin and their role in determining wheat processing properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 45, 219-302. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(03\)45006-7](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(03)45006-7)
- Siddiqui, U.N., Pervaiz, A., Khan, Z.B., Sultana, T. (2022). Diagnostic dilemma, possible nonceliac gluten sensitivity: consideration in approach and management. *Cureus*, 14(5), e25302. <https://doi.org/10.7759/cureus.25302>

- Song, Y., Ren, S., Hou, Y., Li, J., & Xu, Z. (2025). The modification of wheat gluten and its application in flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 106, 225–237. <https://doi.org/10.1002/jsfa.70150>
- Southan, M., MacRitchie, F. (1999). Molecular weight distribution of wheat proteins. *Cereal Chemistry*, 76(6), 827-836. <http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.6.827>
- Stanciu, D., Staykov, H., Dragomanova, S., Tancheva, L., Pop, R.S., Ielciu, I., Crisan, G. (2024). Gluten unraveled: latest insights on terminology, diagnosis, pathophysiology, dietary strategies, and intestinal microbiota modulations-a decade in review. *Nutrients*, 16(21), 3636. <https://doi.org/10.3390/nu16213636>
- Sun, Y., Dong, M., Bai, J., Liu, X., Yang, X., Duan, X. (2023). Preparation and properties of high-soluble wheat gluten protein-based meat analogues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(1), 42-50. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12922>
- Thanhaeuser, S. M., Wieser, H., Koehler, P. (2014). Correlation of quality parameters with the baking performance of wheat flours. *Cereal Chemistry*, 91(4), 333-341. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-09-13-0194-CESI>
- Tosi, P. (2012). Trafficking and deposition of prolamins in wheat. *Journal of Cereal Science*, 56(1): 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.02.004>
- Yu, Y., Wang, F., Yang, Y., Zhang, J., Liu, H., Liang, Y., Wang, J. (2025). Changes in rheological properties and structure of wheat gluten proteins induced by transglutaminase.

- International Journal of Biological Macromolecules*, 295, 139599. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139599>
- Van den Broeck, H.C., de Jong, H.C., Salentijn, E.M., Dekking, L., Bosch, D., Hamer, R.J., Gilissen, L.J., van der Meer, I.M., Smulders, M.J. (2010). Presence of celiac disease epitopes in modern and old hexaploid wheat varieties: wheat breeding may have contributed to the increased prevalence of celiac disease. *Theoretical and Applied Genetics*, 121(8), 1527-39. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1408-4>
- Volta, U., Caio, G., Tovoli, F., & De Giorgio, R. (2013). Non-celiac gluten sensitivity: questions still to be answered despite increasing awareness. *Cellular & Molecular Immunology*, 10(5), 383-392. <https://doi.org/10.1038/cmi.2013.28>
- Wang, Y., Li, Y., Fan, M., Wang, L., Qian, H. (2022). Effect of lactylation on functional and structural properties of gluten. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1018456. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1018456>
- Wieser, H. (2007). Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiology*, 24(2), 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.004>
- Wieser, H., Koehler, P., Scherf, K.A. (2023). Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. *Cereal Chemistry*, 100(1), 23-35. <https://doi.org/10.1002/cche.10572>
- Xu, X., & Li, Y. (2023). Wheat gluten based coatings and films: Preparation, properties, and applications. *Journal of Food Science*, 88(4), 1406-1421. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16454>
- Zhang, M., Jia, R., Ma, M., Yang, T., Sun, Q., Li, M. (2022). Versatile wheat gluten: functional properties and application

- in the food-related industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(30), 10444-10460. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2078785>
- Zhang, D., Jiang, K., Luo, H., Zhao, X., Yu, P., Gan, Y. (2024a). Replacing animal proteins with plant proteins: is this a way to improve quality and functional properties of hybrid cheeses and cheese analogs? *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23, e13262. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13262>
- Zhang, Z., Shi, R., Zhu, X., Zheng, L., Jin, M., Jiang, D., Wu, Y., Gao, H., Chang, Z., Wang, D., Wu, J., Huang, J. (2024b). Purified protein glutaminase from *Chryseobacterium proteolyticum* enhances the properties of wheat gluten. *Food Chemistry X*, 22, 101312. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101312>
- Zheng, F., An, Y., Zhang, M., Zhu, X., Liu, M., & Liu, H. (2026). Self-assembly of wheat gluten: A perspective on enhancing the structural and functional properties of wheat gluten. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103967. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2026.103967>
- Zong, G., Lebwohl, B., Hu, F. B., Sampson, L., Dougherty, L. W., Willett, W. C., Chan, A. T., & Sun, Q. (2018). Gluten intake and risk of type 2 diabetes in three large prospective cohort studies of US men and women. *Diabetologia*, 61(10), 2164–2173. <https://doi.org/10.1007/s00125-018-4697-9>

BÖLÜM 8

COĞRAFI İŞARETLİ GASTRONOMİK ÜRÜNLERDE STANDARDİZASYON- OTANTİKLİK DENGESİ

HATİCE PEKMEZ¹

Giriş

Gastronomi, yalnızca bir tüketim pratiği değil; kültürel kimlik, tarihsel süreklilik, ekonomik değer ve destinasyon rekabetçiliğini aynı anda taşıyan çok katmanlı bir alandır. Bu çok katmanlı yapı içinde coğrafi işaret (Cİ) sistemleri, ürünün kökeniyle kurduğu bağı resmileştiren ve “koruma–kalite–pazarlama” üçlüsünü aynı çatı altında buluşturan kurumsal mekanizmalardır. Türkiye’de Cİ, “belirgin niteliği, ünü veya diğer özellikleri bakımından kökenin bulunduğu yöre/alan/bölge/ülke ile özdeşleşmiş ürünü gösteren işaret” olarak tanımlanmakta; menşe adı ve mahreç işareti biçiminde tescil edilmektedir (TÜRKPATENT, t.y.).

Son yıllarda Cİ’ler gastronomi turizmi ve destinasyon markalaşması bağlamında giderek daha görünür hale gelmiştir (Karataş ve ark., 2023). Türkiye örneklemleri çalışmaları, Cİ’li ürünlerin tanıtım, bilinirlik, turizmle entegrasyon ve marka değeri

¹ Doç.Dr., Gaziantep Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Orcid: 0000-0003-3903-469X

gibi sonuçlar doğurabildiğini; buna karşın farkındalık ve denetim yetersizlikleri gibi yönetim sorunlarının da yaygın olduğunu göstermektedir (Nazıkgül & Ödemiş, 2024; Yeşilçimen, 2025). Yeşilçimen (2025), Divle Obruğu Tulum Peyniri örneğinde yerel farkındalık ile Cİ kavram farkındalığının ayrışabildiğini; denetim yetersizliği ve sahte ürünlerin tüketici güvenliğini zayıflatabileceğini vurgulamaktadır. Benzer biçimde Nazıkgül ve Ödemiş (2024) Bayburt örneğinde, işletmeci ve şeflerin Cİ farkındalığının düşük olabildiğini; Cİ’li ürünlerin menülerde sınırlı yer bulabildiğini rapor etmektedir.

Ne var ki Cİ sistemlerinin gastronomi alanındaki etkisini değerlendirirken tartışmalar çoğu zaman iki uçta yoğunlaşmaktadır: (i) Cİ’ler kaliteyi ve güveni garanti eder; (ii) Cİ’ler kültürel mirası korur. Oysa gastronomik pratik “yaşayan” bir miras alanıdır ve otantiklik çoğu zaman standardizasyonun dışında gelişen ustalık farklılıkları, mevsimsellik, yerel yorum ve bağlamsal değişkenlik üzerinden deneyimlenir. Bu noktada “bilimsel ölçüm ile kültürel otantiklik arasındaki gerilim” belirginleşir: Cİ’lerin getirdiği kayıt altına alma, standardizasyon ve denetim ihtiyacı, gastronominin yerel/baglamsal çeşitliliği ile her zaman sorunsuz biçimde örtüşmeyebilir.

Bu çalışma, söz konusu gerilimi kavramsal düzeyde ele almayı amaçlamaktadır. Kuramsal dayanak olarak otantiklik literatüründe kabul gören sınıflandırmalar, özellikle Wang’ın nesneye dayalı ve varoluşsal otantiklik ayrımı, kullanılarak, Cİ’lerin hem “ölçülebilir kalite” hem de “algılanan otantiklik” üzerindeki etkileri birlikte tartışılmaktadır (Wang, 1999). Ayrıca UNESCO Yaratıcı Şehirler Ağı gibi gastronomi odaklı destinasyonlaşma süreçlerinin, Cİ’leri yalnızca ürün koruma aracı olmaktan çıkarıp “deneyimsel marka bileşeni” haline getirebildiğine ilişkin göstergeler de çerçeveye dahil edilmektedir (UNESCO, t.y.).

Kavramsal Arka Plan: Bilimsel Ölçüm, Standardizasyon ve “Kalite” Mantığı

Gıda bilimi ve gıda mühendisliği perspektifinde kalite; ölçülebilir, karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir parametreler üzerinden tanımlanır. Fizikokimyasal özelliklerin (ör. nem, pH, su aktivitesi), tekstür profilinin, renk ölçümlerinin, reolojik davranışın veya duyuusal ölçüm protokollerinin standartlaşması, ürün güvenilirliği ve tüketici korunması açısından temel bir gereklilik olarak görülür. Bu yaklaşımın güçlü yanı, “kanıtlanabilir” kalite ve güvenlik üretmesidir. Ancak aynı yaklaşım, gastronomik mirasın bazı bileşenlerini (ustalık farkları, yerel yoruma açıklık, mevsimsel değişkenlik) “sapma” veya “tutarsızlık” olarak kodlama eğilimi gösterebilir.

Bu noktada standardizasyonun iki işlevini ayırmak yararlıdır. Birincisi, güvenlik ve hijyen standardizasyonudur; temel amaç riskleri azaltmaktır. İkincisi, ürün kimliği standardizasyonudur; amaç, ürünün “aynı ürün” olarak tanınmasını, ayırt edici özelliklerinin korunmasını ve farklılaşmamasını sağlamaktır. Her iki durumda da ölçüm, belgeleme ve denetim sistemin sürdürülebilirliği için gereklidir. Bununla birlikte gastronomik mirasın “ürün kimliği” boyutu yalnızca ölçüm parametreleriyle açıklanamaz; çünkü tüketici ve turist deneyimi simgesel anlam, hikâye, mekân ve kültürel temas gibi unsurlar aracılığıyla da inşa edilir.

Gastronomik pratiklerde standardizasyonun kaliteyi yükselttiğine dair güçlü varsayım, hizmet ve turizm bağlamında da tartışılmıştır. Miras yemek üretiminde gıda güvenliği yönetim sistemlerinin varlığı, güvenlik risklerini azaltma açısından avantaj sağlayabilir; ancak aynı bağlam, otantiklik risklerinin yönetim biçimine göre değişebileceğini de düşündürür. Almansouri ve arkadaşları (2023), farklı türde yiyecek-içecek işletmelerinde miras yemeklerin hazırlanmasına ilişkin güvenlik ve otantiklik risklerini değerlendirmiş ve gıda güvenliği yönetim sistemlerinin güvenlik

risklerini azaltabileceğine işaret etmiştir. Bu tür bulgular, standardizasyonun “güvenlik” tarafındaki yararını görünür kılarken; otantiklik boyutunun daha karmaşık ve bağlamsal olduğunu da hatırlatır (Almansouri ve ark., 2023).

Otantiklik Kuramı: Nesneye Dayalı ve Varoluşsal Otantiklik

Otantiklik, turizm ve gastronomi literatüründe uzun zamandır tartışılan; ancak tek bir tanıma indirgenmesi güç bir kavramdır. Wang (1999), turist deneyiminde otantikliğin farklı anlam katmanlarını sistematik biçimde ele alarak nesneye dayalı yaklaşımların sınırlılıklarını tartışmış ve “varoluşsal otantiklik” fikrini önermiştir. Bu yaklaşım, otantikliğin yalnızca “orijinal nesne/ürün”e bağlı olmadığını; deneyimin öznel ve ilişkisel boyutları aracılığıyla da üretildiğini vurgular (Wang, 1999).

Bu ayırım gastronomiye uyarlandığında iki temel boyut belirginleşir. Nesneye dayalı otantiklik, ürünün “doğru yerden, doğru yöntemle, doğru bileşenlerle” üretilmiş olmasına atıf yapar. Cİ sistemleri bu boyutu güçlendirmeye adaydır; çünkü ürün tanımı, coğrafi sınır, üretim yöntemi ve ayırt edici özellikler kayıt altına alınır (TÜRKPATENT, t.y.). Varoluşsal otantiklik ise tüketicinin/turistin deneyimde “kendini gerçek, temasın sahibi, bağın anlamlı” hissetmesiyle ilgilidir. Burada hikâye, ustayla etkileşim, mekânın atmosferi ve yerel pratiklerin canlılığı belirleyici olabilir (Wang, 1999).

Türkiye’de yerel yemek deneyimi ve otantiklik algısına odaklanan güncel çalışmalar, otantikliğin çok boyutlu algılandığını göstermektedir. Kuşadası örneklemleri bir araştırmada yerel halk ve yerli turist örneklemlerinden elde edilen faktörlerin farklılaşabildiği; buna karşın otantiklik bakış açıları arasında anlamlı bir farklılık bulunmadığı rapor edilmiştir (Kaçar & Güzel, 2025). Yiyecek deneyimi literatüründe de otantiklik arayışının estetik ve eğitsel yiyecek deneyimini etkileyebildiği; deneyim boyutlarının

davranışsal niyetlerle ilişkilenebildiği gösterilmektedir (Yordam & Akkuş, 2022). Bu bulgular, otantikliğin yalnızca ürün bileşimi veya teknik parametrelerden ibaret olmadığını; deneyimsel ve kültürel bir inşa olduğunu destekler. Dolayısıyla Cİ sistemlerinin otantiklikle ilişkisi “otomatik” değildir: Cİ, nesneye dayalı otantiklik iddiasını güçlendirebilir; fakat varoluşsal otantiklik çoğu zaman standardizasyonun ötesinde bir canlılık ve ilişkisellik gerektirir (Wang, 1999).

Coğrafi İşaretler: Koruma Aracı mı, Deneyimsel Marka Bileşeni mi?

Cİ’nin kurumsal mantığı

Türk Patent ve Marka Kurumu’nun tanımı, Cİ’nin kökenle özdeşleşmiş nitelik/ün/özellik vurgusunu açık biçimde ortaya koyar ve tescil biçimlerini (menşe adı/mahreç işareti) belirtir (TÜRKPATENT, t.y.). Bu kurumsal mantık, Cİ’nin temel olarak ayırıştırma, izlenebilirlik, koruma ve kalite güvencesi işlevlerine odaklandığını gösterir. Uluslararası literatür de Cİ etiketlerinin izlenebilirlik, otantiklik ve farklılaştırma gibi özelliklerle ilişkilendirildiğini; uygulama süreçleri, yönetim zorlukları ve örnek vakalar üzerinden Cİ sistemlerinin çok katmanlı doğasını tartışmaktadır (Crespo-Moncada ve ark., 2025).

Gastronomi ve destinasyon bağlamında Cİ

Cİ’lerin turizmle ilişkisi yalnızca ekonomik katma değer üzerinden değil, destinasyon imajı ve marka değeri üzerinden de okunmaktadır (Karataş ve ark., 2023). Türkiye örnekli çalışmalar, Cİ’li ürünlerin gastronomi turizmi potansiyelini destekleyebileceğini; ancak bunun için menü entegrasyonu, tanıtım ve farkındalık gerektirdiğini ortaya koymaktadır (Nazıkgül & Ödemiş, 2024).

Gaziantep örneği, Cİ–gastronomi–destinasyon markası kesişimini görünür kılan güçlü bir bağlamdır. Gaziantep’in UNESCO Yaratıcı Şehirler Ağı’na gastronomi alanında dâhil olması, şehrin gastronomi çekiciliğini küresel ölçekte görünür kılan bir çerçeve sunmaktadır (UNESCO, t.y.). Bu tür destinasyonlarda Cİ’ler, yalnızca “ürün etiketi” değil; anlatı, deneyim, festivalleşme ve kimlik aktarımıyla entegre edilen marka unsurları haline gelebilir (Karataş ve ark., 2023; UNESCO, t.y.).

Gerilim Alanının Tanımı: Ölçülebilir Kalite ile Yaşayan Miras Arasında

Cİ sistemleri, ürün tanımını belirli ölçüde “sabitlemeyi” gerektirir: hammaddeler, üretim aşamaları, coğrafi sınır ve ayırt edici özellikler netleşir (TÜRKPATENT, t.y.). Bu sabitleme, sahteciliğe karşı koruma, tüketici güveni ve pazarlama açısından avantaj üretir. Ancak gastronomik mirasın doğası, özellikle gündelik üretim ve ev içi/usta pratiği söz konusu olduğunda, belirli bir esnekliği içerir. Bu gerilimi üç düzeyde kavramsallaştırmak mümkündür.

Ürün düzeyinde gerilim, teknik parametrelerin sabitlenmesi ile yerel varyasyonun doğal oluşu arasındaki farktan kaynaklanır. Bir tarafta belirli bir doku/aroma profiline yönelen sabitleme, diğer tarafta mevsimsel hammadde değişkenliği ve usta yorumu gibi pratiklerin ürettiği çeşitlilik bulunur. Aşırı sabitleme, ürünün “tek tip”leşmesine ve yerel çeşitliliğin “standart dışı” olarak damgalanmasına yol açabilir. Yetersiz sabitleme ise ürün kimliğinin belirsizleşmesi ve sahte ürünlerin artmasıyla sonuçlanabilir. Yeşilçimen’in (2025) sahte ürünlerin tüketici güvenini zayıflatabildiğine ilişkin bulgusu bu riske işaret eder.

Üretici/usta düzeyinde gerilim, denetim ve uygunluk gereklilikleri ile “yazılı olmayan bilginin” aktarım pratikleri arasındaki uyum sorunlarında görünür olur. Ustalık pratikleri çoğu zaman sözlü gelenek ve deneyim üzerinden aktarılır. Bu aktarımın

Cİ belgesiyle uyumlulaştırılması, bir yandan geleneksel bilgiyi kayıt altına alıp koruyabilir; öte yandan yaratıcılık ve bağlamsal uyum alanını daraltabilir. Denk (2024), Erzurum Demir Tatlısı örneğinde Cİ tescil belgesine uyum, üretim sürecinin kayıt altına alınması ve gastronomi turizmi potansiyeli bağlamlarını birlikte ele alarak belgeleme/uyumlaştırma ihtiyacının altını çizmektedir.

Deneyim/destinasyon düzeyinde gerilim ise otantikliğin deneyimsel inşa niteliğiyle ilişkilidir. Turist deneyiminde otantiklik yalnızca ürünün “doğru” üretilmesiyle değil; anlatı, mekân, ilişki ve atmosferle kurulan bağla da oluşur (Wang, 1999). Bu nedenle Cİ’nin güçlendirdiği nesneye dayalı otantiklik, varoluşsal otantiklik üretimini otomatik olarak garanti etmez. Yerel yiyecek deneyimi çalışmalarında otantiklik arayışı–deneyim–davranışsal niyet zincirlerinin tartışılması da deneyim boyutunun belirleyiciliğini güçlendirmektedir (Yordam & Akkuş, 2022).

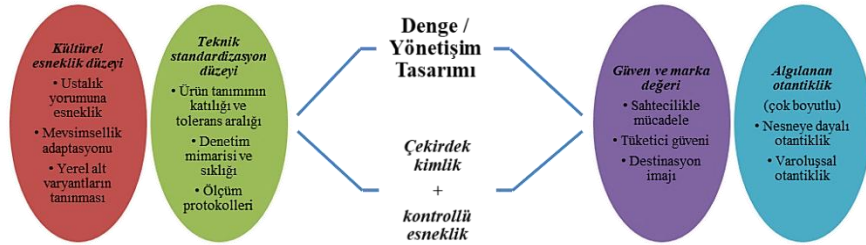
Önerilen Kavramsal Çerçeve: “Denge Modeli”

Bu çalışmada önerilen Standardizasyon–Otantiklik Denge Modeli, coğrafi işaretler, gastronomik otantiklik ve ürün standardizasyonu literatürünün kavramsal sentezi temelinde geliştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle coğrafi işaret yönetişimi, gastronomik mirasın korunması ve turizm deneyiminde otantiklik konularına ilişkin ulusal ve uluslararası çalışmalar incelenmiş; literatürde tekrar eden temel kavramlar belirlenmiştir. Literatür incelemesi sonucunda teknik standardizasyon, kültürel esneklik, algılanan otantiklik ve güven/marka değeri kavramlarının coğrafi işaret (Cİ) sistemlerinin işleyişinde merkezi bir rol oynadığı görülmüştür. Bu kavramlar arasındaki ilişkiler teorik olarak değerlendirilmiş ve gastronomik miras yönetimi bağlamında bütüncül bir kavramsal çerçeve oluşturulmuştur.

Bu çalışma, Cİ’li gastronomik ürünlerde ortaya çıkan “ölçüm–otantiklik gerilimi”ni açıklamak amacıyla denge temelli bir

model önermektedir. Model dört temel değişken etrafında yapılandırılmıştır. Teknik standardizasyon düzeyi, ürün tanımının katılığı, bileşen ve üretim süreçlerinde tanımlanan tolerans aralıkları, denetim mimarisi ve ölçüm protokollerinin kullanım derecesi ile ilişkilidir. Kültürel esneklik düzeyi ise ustalık yorumuna tanınan alanı, mevsimselliğin üretim süreçlerine uyarlanmasını ve yerel alt varyantların tanınmasını kapsamaktadır. Algılanan otantiklik, nesneye dayalı otantiklik ile varoluşsal otantiklik ayrımı üzerinden çok boyutlu biçimde ele alınmaktadır (Wang, 1999). Güven ve marka değeri ise sahte ürünlerle mücadele kapasitesi, tüketici güveninin korunması ve destinasyon imajına katkı gibi çıktılar aracılığıyla görünür hale gelmektedir (Karataş ve ark., 2023). Bu bağlamda model, standardizasyonu yalnızca teknik bir uyum mekanizması olarak değil, aynı zamanda otantiklik ve güven çıktılarıyla ilişkili bir yönetim tasarımı olarak ele almaktadır. Modelin temel bileşenleri ve değişkenler arası ilişkiler Şekil 1’de şematik olarak özetlenmektedir.

Şekil 1. Standardizasyon–Otantiklik Denge Modeli



Kaynak: Model, coğrafi işaret yönetimi ve gastronomik otantiklik literatürü temel alınarak yazar tarafından geliştirilmiştir.

Modelde önerilen ilişkiler, literatürde coğrafi işaretlerin ürün kimliği ve izlenebilirlik işlevi (TÜRKPATENT, t.y.; Crespo-Moncada ve ark., 2025), otantikliğin nesneye dayalı ve varoluşsal boyutları (Wang, 1999) ve denetim/sahtecilik risklerinin güven ile

marka değerine etkileri (Yeşilçimen, 2025) erevesinde aşağıdaki ermelerle formüle edilebilir:

- P1 (*Standardizasyon → Nesneye dayalı otantiklik ve güven*): Teknik standardizasyon düzeyi (rn tanımı, tolerans aralıkları, denetim ve ölçüm protokolleri) arttıkça, coğrafi işaretili ürünlerde nesneye dayalı otantiklik algısının ve izlenebilirlik temelli güvenin güçlenmesi beklenmektedir (TÜRKPATENT, t.y.; Crespo-Moncada ve ark., 2025).
- P2 (*Aşırı standardizasyon → Varoluşsal otantiklik riski*): Teknik standardizasyonun aşırı katılaşması, üretim sürecinde kültürel esneklik alanını daraltarak ustalık pratiği, yerel yorum ve bağlamsal çeşitliliğin deneyimlenmesini sınırlayabilir; bu durum, otantikliğin varoluşsal boyutunu zayıflatma riski taşımaktadır (Wang, 1999).
- P3 (*Yetersiz standardizasyon → Sahtecilik ve marka değeri riski*): *Standardizasyon ve denetimin yetersiz kaldığı durumlarda sahte/benzer ürünlerin artması* olasıdır; bu durum tüketicinin güvenini ve dolayısıyla ürünün/destinasyonun marka değerini olumsuz etkileyebilir (Yeşilçimen, 2025).
- P4 (*Denge noktası → En yüksek toplam ıktı*): Bu ervede, coğrafi işaret yönetişiminde en yüksek toplam çıktının (güven + otantiklik), orta düzey kontrollü standardizasyon ile tanımlı kültürel esnekliğin birlikte var olduğu denge noktasında ortaya çıkması beklenmektedir.

Bu ermeler doğrultusunda model, coğrafi işaret sistemlerinde standardizasyonun yalnızca teknik uyum değil, aynı zamanda kültürel mirasın sürdürülebilirliği ve destinasyon markalaşmasıyla ilişkili bir yönetişim tasarımı olduğunu vurgulamaktadır. Model kavramsal bir öneri niteliği taşımakla

birlikte, gelecekte yapılacak ampirik araştırmalar için test edilebilir bir çerçeve sunmaktadır.

Tartışma: Cİ Yönetişimi için Kritik Sorular

“Standart reğete” mirası korur mu, dondurur mu?

Cİ dokümantasyonu, geleneksel üretimi kayıt altına alarak korumayı hedefler. Erzurum Demir Tatlısı örneğinde üretim aşamalarının ve geleneksel bileşenlerin ayrıntılı biçimde ele alınması, kültürel mirasın korunmasına hizmet eden bir strateji olarak sunulmaktadır (Denk, 2024). Bununla birlikte bu tür belgeleme pratikleri “tek doğru tarif” algısını pekiştirerek yerel çeşitliliği gölgeleme riskini de taşır. Bu nedenle çözüm, tarifiñ “çekirdek kimliğini” korurken yerel/ustalık varyasyonlarını dışlamayan bir yaklaşım geliştirmektir.

Denetim, otantiklik algısını nasıl etkiler?

Denetim güven üretir; güven ise marka değerinin temel bileşenidir. Bununla birlikte denetimin dili ve pratiklerinin “kültürel pratik” ile çatışmaması gerekir. Yeşilçimen (2025), denetim yetersizliğinin ve sahte ürünlerin güveni zayıflattığını; Cİ’li ürünlerin etkisini artırmak için denetim mekanizmalarının iyileştirilmesi gerektiğini vurgular. Buradan hareketle denetim, yalnızca “uygunsuzluk yakalama” değil; yerel aktörlerle birlikte “kültürel standardı sürdürme” biçiminde kurgulandığında otantiklik algısını destekleyen bir zemine dönüşebilir.

Cİ’nin turizmdeki değeri: etiketten deneyime

Nazıkgül ve Ödemiş’in (2024) bulguları, Cİ’li ürünlerin menülerde sınırlı yer bulabildiğini ve farkındalık eksikliğinin etkili olabileceğini göstermektedir. Bu durum, Cİ’nin turizm değerinin kendiliğinden ortaya çıkmadığını; menü tasarımı, hikâyeleştirme, yerel üreticiyle bağ kurma ve destinasyon stratejileriyle entegrasyon gerektirdiğini düşündürür (Karataş ve ark., 2023). UNESCO

gastronomi şehirleri bağlamında gastronominin festivalleşme, kültürlerarası diyalog ve sosyal bağlar üzerinden ele alınması da Cİ'lerin deneyimsel marka bileşenine dönüşme potansiyelini güçlendirmektedir (UNESCO, t.y.).

Politika ve Uygulama Önerileri

Bu bölüm, Türkiye’de Cİ yönetişimi ve gastronomi turizmi uygulamaları için “ölçüm–otantiklik dengesini” güçlendirecek öneriler sunmaktadır. İlk olarak ürün tanımında “çekirdek + esnek çeper” yaklaşımı benimsenmelidir. Çekirdek kriterler, ürün kimliğini belirleyen vazgeçilmez bileşen ve işlem adımlarını kapsarken; esnek çeper, mevsimsellik ve usta yorumuna izin veren tolerans alanlarını içerir. Bu yaklaşım, hem ölçülebilir kaliteyi hem yaşayan mirası birlikte destekleyebilecek bir tasarım sunar.

İkinci olarak denetimde katılımcı model güçlendirilmelidir. Denetim, yalnızca bürokratik bir kontrol değil; yerel aktörlerle “ortak kalite kültürü” üretme süreci olarak kurgulanmalıdır. Yerel birlik/kooperatiflerin güçlendirilmesi, üretici eğitimleri ve tüketici bilgilendirme kampanyaları bu süreci destekleyebilir (Yeşilçimen, 2025).

Üçüncü olarak turizm entegrasyonu “menüde görünürlük + anlatı tasarımı” ekseninde ele alınmalıdır. Cİ’li ürünlerin menülerde yer bulması, şef/işletmeci farkındalığı ve destinasyon stratejileriyle ilişkilidir (Nazikgöl & Ödemiş, 2024). Menüde Cİ ibaresi ve kısa köken anlatısı, üretici ziyaretleri/atölyeler, yerel hikâye anlatımı ve tadım rotaları gibi uygulamalar varoluşsal otantiklik üretimini güçlendirebilir (Wang, 1999).

Dördüncü olarak sahte ürünlerle mücadelede izlenebilirlik iletişimi güçlendirilmelidir. Sahte ürünlerin güveni zayıflatması marka değerini doğrudan etkiler (Yeşilçimen, 2025). Bu nedenle izlenebilirlik araçları (etiketleme, QR tabanlı doğrulama, resmi veri tabanı yönlendirmesi) yalnızca teknik sistem değil; tüketiciye açık,

anlaşılır bir iletişim stratejisi olarak tasarlanmalıdır (TÜRKPATENT, t.y.).

Gelecek Araştırmalar için Öneriler

Bu çalışma kavramsal bir tartışma sunduğundan, önerilen modelin ampirik olarak sınanması önemlidir. Gelecek çalışmaların; algılanan otantiklik (nesneye dayalı + varoluşsal) ile Cİ farkındalığı ilişkisini (Wang, 1999; Kaçar & Güzel, 2025), denetim algısı → güven → marka değeri biçimindeki aracılık mekanizmasını (Yeşilçimen, 2025) ve standardizasyon düzeyi ile kültürel esneklik düzeyi etkileşiminin memnuniyet ve tavsiye niyetine etkisini (Yordam & Akkuş, 2022) incelemesi yararlı olacaktır. Ayrıca UNESCO gastronomi şehirleri gibi destinasyonlarda Cİ’lerin deneyim tasarımı içindeki rolü, Gaziantep gibi bağlamlarda derinlemesine ele alınabilir (Karataş ve ark., 2023; UNESCO, t.y.).

Sonuç

Coğrafi işaret sistemleri, kökenle özdeşleşmiş ürünleri koruyan ve tescil aracılığıyla ürün kimliğini kayıt altına alan kurumsal mekanizmalardır (TÜRKPATENT, t.y.). Gastronomi alanında Cİ’ler aynı zamanda turizm ve markalaşma açısından değer üretebilir; ancak bu değer, standardizasyonun niteliği ve kültürel esneklikle kurduğu ilişkiye bağlıdır (Karataş ve ark., 2023; UNESCO, t.y.). Türkiye örnekli çalışmaların işaret ettiği farkındalık, menü entegrasyonu, denetim ve sahte ürün sorunları; Cİ’nin potansiyelinin kendiliğinden açığa çıkmadığını göstermektedir (Nazıkgül & Ödemiş, 2024; Yeşilçimen, 2025).

Bu çalışma, “bilimsel ölçüm/standardizasyon” ile “kültürel otantiklik/yaşayan miras” arasındaki gerilimi kavramsal bir denge modeliyle ele almıştır. Wang’ın (1999) nesneye dayalı ve varoluşsal otantiklik ayrımı, Cİ’lerin nesneye dayalı otantiklik iddiasını güçlendirebileceğini; buna karşın varoluşsal otantikliğin deneyimsel ve ilişkisel boyutlarla üretildiğini göstermektedir. Bu nedenle Cİ

yönetişiminde amaç, tek tip standardizasyon değil; çekirdek kimliği korunurken kültürel esnekliği tanıyan, denetimi katılımcı hale getiren ve turizm entegrasyonunu deneyim tasarımıyla destekleyen bir yaklaşım olmalıdır. Böylece Cİ'ler, hem ölçülebilir kaliteyi hem de sahici gastronomik mirası aynı anda taşıyabilen sürdürülebilir bir marka bileşenine dönüşebilir. Bu yönüyle çalışma, gastronomi literatüründe standardizasyon ve otantiklik arasındaki ilişkiyi yönetim perspektifinden ele alarak coğrafi işaretli ürünlerin yönetimine ilişkin kavramsal bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

- Almansouri, M., Luning, P. A., Almuhan, M., & Verkerk, R. (2023). Safety and authenticity risks in heritage food preparation at different types of food service establishments: A case study of Saudi Arabia. *Heliyon*, 9(2), Article e13042. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13042>
- Crespo-Moncada, B., Posada-Izquierdo, G. D., Velásquez-Rivera, J., Molina-Villamar, J., & García-Gimeno, R. M. (2025). Geographical indication labels for food products: A literature review. *Encyclopedia*, 5(3), 115. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5030115>
- Denk, E. (2024). Challenges and opportunities in geographical indication registered gastronomic products: Erzurum Rosette. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1460663. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1460663>
- Kaçar, B., & Güzel, B. (2025). Yiyecek içeceklerde otantiklik: Yerel halk ve yerli turist bakış açısının karşılaştırılması. *Tourism and Recreation*, 7(1), 164–173. <https://doi.org/10.53601/tourismandrecreation.1548510>
- Karataş, M., Aksu, F. B., & Deniz, G. (2023). UNESCO Yaratıcı Şehri Gaziantep'in gastronomi turizmi cazibe unsurları. *Turizm ve İşletme Bilimleri Dergisi*, 3(1), 105–125.
- Nazıkgül, M., & Ödemiş, M. (2024). Coğrafi işaretli ürünlerin gastronomi turizmi açısından incelenmesi: Bayburt örneği. *Safran Kültür ve Turizm Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 151–177.
- Türk Patent ve Marka Kurumu. (t.y.). *Coğrafi işaret nedir?* <https://ci.turkpatent.gov.tr/sayfa/cografi-isaret-nedir> Erişim tarihi: 2 Mart 2026.

- UNESCO. (t.y.). *Gaziantep – Creative Cities Network*.
<https://www.unesco.org/en/creative-cities/gaziantep> Erişim tarihi: 2 Mart 2026.
- Wang, N. (1999). Rethinking authenticity in tourism experience. *Annals of Tourism Research*, 26(2), 349–370.
- Yeşilçimen, P. (2025). Turistik bir ürün olarak coğrafi işaretli ürünlerin bilinirliği, bölgesel kalkınma ve markalaşmaya etkisi: Karaman Divle Obruğu Tulum Peyniri rneği. *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 13(3), 3041–3062.
<https://doi.org/10.21325/jotags.2025.1701>
- Yordam, S., & Akkuş, G. (2022). Otantiklik arayışı, yiyecek deneyimi ve tavsiye etme niyeti arasındaki ilişkilerin incelenmesi: Alaçatı Ot Festivali rneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 24(4), 1606–1620.

BÖLÜM 9

POPÜLER DİYET MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ: METABOLİK VE ÇEVRESEL ÇIKTILARI

BEYZA KARAYİĞİT¹

Giriş

Küresel ölçekte obezite, tip 2 diyabet, kardiyovasküler hastalıklar ve diğer kronik metabolik bozuklukların artışı, beslenme biliminin yalnızca bireysel sağlık çıktıları üzerinden ele alınamayacağını açık biçimde göstermektedir. Günümüzde beslenme örüntüleri; metabolik sağlık, hastalıkların önlenmesi, gıda sistemlerinin sürdürülebilirliği, doğal kaynakların korunması ve

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Beslenme ve Diyetetik, Orcid: 0000-0001-9211-79168

toplumsal erişilebilirlik gibi çok sayıda boyutu aynı anda içeren bütüncül bir halk sağlığı konusu haline gelmiştir. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre yetişkinlerde fazla kiloluluk ve obezite yükü giderek artmakta; Uluslararası Diyabet Federasyonu da diyabetin küresel ölçekte önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam ettiğini bildirmektedir (WHO, 2025; IDF, 2025). Bu durum, diyet modellerinin yalnızca enerji dengesi veya kilo kaybı açısından değil, uzun dönem kardiyometabolik sağlık ve sürdürülebilir yaşam koşulları bağlamında da değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Beslenme araştırmalarında son yıllarda belirginleşen bu değişimi, “sağlıklı diyet” kavramının kapsamını genişletmiştir. Geleneksel yaklaşımda sağlıklı beslenme daha çok yeterli ve dengeli besin ögesi alımı, makro besin ögesi dağılımı, enerji dengesi ve hastalık risklerinin azaltılması üzerinden tanımlanırken; güncel yaklaşım bu tanıma çevresel sürdürülebilirlik, kültürel kabul edilebilirlik, ekonomik erişilebilirlik ve gıda sistemlerinin dayanıklılığı gibi ölçütleri de dahil edilmektedir. FAO ve WHO tarafından tanımlanan sürdürülebilir sağlıklı diyetler; bireylerin sağlığını ve iyi oluşunu destekleyen, çevresel etkisi düşük, güvenli, beslenme açısından yeterli, kültürel olarak kabul edilebilir ve ekonomik olarak ulaşılabilir beslenme örüntüleri olarak ele alınmaktadır (FAO & WHO, 2019).

Gıda sistemleri, iklim değişikliği ve ekolojik bozulma açısından önemli belirleyicilerden biridir. Tarımsal üretim, hayvansal gıda üretimi, arazi kullanımındaki değişimler, tatlı su tüketimi, enerji girdileri, gübre ve pestisit kullanımı, taşıma, işleme ve gıda kayıpları; diyetlerin çevresel etkilerini şekillendiren başlıca unsurlar arasında yer almaktadır. Yaşam döngüsü analizlerine dayalı çalışmalar, gıdaların çevresel etkilerinin üretim koşullarına göre değişebileceğini; ancak genel olarak hayvansal kaynaklı ürünlerin, özellikle kırmızı et ve süt ürünlerinin, bitkisel kaynaklı ürünlere göre daha yüksek sera gazı emisyonu, arazi kullanımı ve çevresel yük oluşturma eğiliminde olduğunu göstermektedir (Poore & Nemecek,

2018; Springmann ve ark., 2018). Bu nedenle beslenme bilimi, bireysel sağlık hedefleri ile ekolojik sınırlar arasında denge kuran daha kapsamlı bir değerlendirme alanına dönüşmektedir. Bu dönüşüm, popüler diyet modellerinin yeniden ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Akdeniz diyeti, DASH diyeti, vejetaryen ve vegan beslenme modelleri, fleksitaryen yaklaşımlar, düşük karbonhidratlı diyetler, ketojenik diyet, paleolitik beslenme örüntüsü, yüksek proteinli diyetler ve aralıklı açlık uygulamaları hem bilimsel literatürde hem de toplumda yoğun ilgi gören beslenme modelleri arasında yer almaktadır. Bu diyetlerin her biri farklı teorik temellere, besin grubu dağılımlarına ve metabolik hedeflere sahiptir. Bazı modeller kilo kaybı, glisemik kontrol veya kan lipitleri açısından kısa dönemli yararlar sağlayabilirken; bazıları uzun dönem kardiyovasküler risk, besin ögesi yeterliliği, bağırsak mikrobiyotası, sürdürülebilirlik ve çevresel ayak izi açısından daha dikkatli değerlendirilmelidir. Farklı diyet modellerinin gerçek etkilerini anlayabilmek için epidemiyoloji, metabolizma, çevre bilimleri, yaşam döngüsü analizi, sürdürülebilir tarım, davranış bilimleri ve sağlık ekonomisi gibi alanlardan elde edilen verilerin birlikte yorumlanması gerekmektedir. Ancak mevcut literatürde çalışmaların önemli bir bölümü ya metabolik sonuçlara ya da çevresel çıktılarına odaklanmakta; bu iki alanı eş zamanlı ele alan bütünsel değerlendirmeler görece sınırlı kalmaktadır. Bu bölümün amacı, günümüzde yaygın biçimde benimsenen popüler diyet modellerini metabolik ve çevresel çıktılar açısından karşılaştırmalı olarak incelemektir.

Akdeniz Diyeti

Akdeniz Diyeti, Akdeniz havzasında yaşayan toplumların geleneksel beslenme ve yaşam biçiminden köken alan; yalnızca belirli besinlerin tüketimine değil, besin kalitesi, öğün düzeni, fiziksel aktivite, sosyal yeme kültürü ve yerel gıda sistemleriyle ilişkili

bütüncül bir beslenme örüntüsüdür. Bu modelin bilimsel temelleri, özellikle 1950’li ve 1960’lı yıllarda yürütülen epidemiyolojik çalışmalar ve Seven Countries Study kapsamında elde edilen kardiyovasküler hastalık bulgularıyla güçlenmiştir (Keys, 1980). Geleneksel Akdeniz örüntüsü; sebze, meyve, tam tahıl, kurubaklagil, yağlı tohum ve zeytinyağının yüksek tüketimi; balık ve deniz ürünlerinin orta düzeyde yer alması; kırmızı et, işlenmiş et, rafine karbonhidrat ve ultra işlenmiş ürünlerin ise sınırlı tüketimiyle tanımlanmaktadır (Keys, 1980; Trichopoulou ve ark., 2003; Bach-Faig ve ark., 2011; Dernini ve ark., 2017; Filippou ve ark., 2020). Akdeniz Diyeti’nin metabolik yararları, yüksek posa içeriği, düşük-orta glisemik yükü ve antioksidan ile fitokimyasal bileşenlerden zengin yapısıyla ilişkilidir. Tam tahıllar, kurubaklagiller, sebze ve meyvelerden sağlanan posa; postprandiyal glisemik yanıtın dengelenmesine, insülin duyarlılığının desteklenmesine ve tip 2 diyabet riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilir. Zeytinyağından gelen tekli doymamış yağ asitleri ile yağlı tohumlar ve balıktan sağlanan çoklu doymamış yağ asitleri ise inflamasyon, oksidatif stres ve lipid metabolizması üzerinde olumlu etkiler gösterebilir. Meta-analizler ve şemsiye derlemeler, Akdeniz Diyeti’ne yüksek uyumun tip 2 diyabet, kardiyovasküler hastalıklar, bazı kanser türleri ve toplam mortalite riskinde azalma ile ilişkili olduğunu bildirmektedir (Sofi ve ark., 2014; Dinu ve ark., 2018; Guasch-Ferré & Willett, 2021). Diyetin kardiyoprotektif etkileri; LDL-kolesterol oksidasyonunun azalması, HDL fonksiyonunun desteklenmesi, trigliserit düzeylerinin iyileşmesi, endotelial fonksiyonun korunması ve inflamatuvar belirteçlerdeki olumlu değişikliklerle açıklanmaktadır. Bu nedenle Akdeniz Diyeti yalnızca hastalık riskini azaltan bir beslenme modeli değil, kardiyometabolik risk faktörlerini çok yönlü biçimde hedefleyen koruyucu bir yaşam tarzı yaklaşımıdır (Estruch ve ark., 2018; Martínez-González ve ark., 2015; Dinu ve ark., 2018; Guasch-Ferré & Willett, 2021). Obezite yönetiminde de bu modelin değeri, yalnızca ağırlık kaybı sağlamasından değil;

ağırlık kontrolü sürecinde yüksek besin ögesi yoğunluğu, düşük enerji yoğunluğu ve uzun dönem uyum potansiyeli sunmasından kaynaklanmaktadır (Esposito ve ark., 2011; Dinu ve ark., 2018; Guasch-Ferré & Willett, 2021; Sofi ve ark., 2014). Akdeniz Diyeti çevresel sürdürülebilirlik açısından da güçlü bir model olarak değerlendirilmektedir. Bitkisel kaynaklı besinlere dayanması ve kırmızı/işlenmiş et tüketimini sınırlandırması; sera gazı emisyonu, arazi kullanımı ve enerji tüketimi gibi çevresel göstergeler üzerinde daha düşük yük oluşturabilir. Yaşam döngüsü değerlendirmeleri, Batı tipi beslenme örüntüleriyle karşılaştırıldığında Akdeniz Diyeti'ne yüksek uyumun çevresel etkiyi azaltabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle Akdeniz Diyeti, insan sağlığını destekleyen beslenme bileşenlerini daha düşük çevresel etkiyle birleştirebilen önemli modellerden biridir (Sáez-Almendros ve ark., 2013; Aleksandrowicz ve ark., 2016; Poore & Nemecek, 2018; Willett ve ark., 2019). Bununla birlikte Akdeniz Diyeti'nin çevresel etkisi, uygulama biçimine göre değişebilmektedir. Yerel, mevsimsel, kurubaklagil ve tam tahıl ağırlıklı bir örüntü çevresel açıdan daha avantajlı iken; ithal ürünlere, yüksek balık tüketimine, yoğun süt ürünü kullanımına veya enerji girdisi yüksek üretim süreçlerine dayalı uygulamalar bu kazanımları azaltabilir. Ayrıca bazı meyve ve sebzelerin sulama gereksinimi, zeytinyağı üretiminde bölgesel su baskısı ve balık tüketiminde sürdürülebilir avcılık sorunları dikkate alınmalıdır. Bu nedenle modelin çevresel üstünlüğü, geleneksel, yerel ve mevsimsel uygulama biçimiyle daha belirgin hâle gelmektedir (Tepper ve ark., 2022; Sáez-Almendros ve ark., 2013; FAO & WHO, 2019; Poore & Nemecek, 2018). Akdeniz Diyeti'nin temel güçlü yönlerinden biri, metabolik sağlık yararları ile sürdürülebilirlik ilkelerini aynı çerçevede bütünleştirebilmesidir. Besin çeşitliliğini desteklemesi, mikro besin ögesi yetersizliği riskinin görece düşük olması ve farklı toplumlara kültürel olarak uyarlanabilir bir yapı sunması, uzun dönem uygulanabilirliğini artırmaktadır. Ancak kaliteli zeytinyağı, balık, yağlı tohumlar ve taze

ürünlerin bazı bölgelerde maliyetli olması, ekonomik erişilebilirlik açısından sınırlılık oluşturabilir. Bu nedenle Akdeniz Diyeti'nin halk sağlığı uygulamalarına aktarılmasında ideal beslenme örüntüsünün yanı sıra yerel gıda kültürü, gelir düzeyi, gıda fiyatları ve erişim olanakları da dikkate alınmalıdır (Dernini ve ark., 2017; FAO & WHO, 2019; Willett ve ark., 2019; Guasch-Ferré & Willett, 2021). Sonuç olarak Akdeniz Diyeti; kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi, tip 2 diyabet riskinin azaltılması, inflamasyonun kontrolü, lipid metabolizmasının iyileştirilmesi ve uzun dönem ağırlık yönetiminin desteklenmesi açısından güçlü kanıtlara sahip bir beslenme modelidir. Bitkisel kaynaklı besinleri önceleme, kırmızı et tüketimini sınırlandırması ve geleneksel gıda kültürüyle uyumlu olması nedeniyle sürdürülebilir sağlıklı diyet ilkeleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Ancak bu modelin etkisi, yalnızca "Akdeniz tipi" olarak adlandırılmasına değil; gerçek besin bileşimine, yerel ve mevsimsel ürün kullanımına, hayvansal besin miktarına, besin kalitesine ve bireysel uyuma bağlıdır. Bu nedenle Akdeniz Diyeti, klinik beslenme ve sürdürülebilir gıda sistemleri açısından referans alınabilecek; ancak uygulama bağlamı dikkatle değerlendirilmesi gereken bütüncül bir beslenme yaklaşımıdır (Estruch ve ark., 2018; FAO & WHO, 2019; Willett ve ark., 2019; Tepper ve ark., 2022).

Gezegensel Sağlık Diyeti / EAT-Lancet Modeli (PHD)

Gezegensel Sağlık Diyeti, diğer adıyla EAT-Lancet modeli, insan sağlığını gezegenin ekolojik sınırlarıyla birlikte ele alan bütüncül bir beslenme yaklaşımıdır. Bu model, 2050 yılına kadar artan dünya nüfusunun yeterli ve sağlıklı beslenmesini desteklerken, gıda sistemlerinin iklim değişikliği, arazi kullanımı, biyolojik çeşitlilik kaybı, tatlı su tüketimi ve azot-fosfor döngüleri üzerindeki baskısını azaltmayı hedeflemektedir. Bu yönüyle Gezegensel Sağlık Diyeti yalnızca bireysel metabolik sağlık sonuçlarına odaklanan bir diyet modeli değil; halk sağlığı, çevre bilimleri, tarım politikaları ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerini bir arada değerlendiren referans

bir çerçevedir (Willett ve ark., 2019; Springmann ve ark., 2018; FAO & WHO, 2019).

Bu model katı bir vegan veya vejetaryen diyet değildir; ancak bitkisel kaynaklı besinleri beslenmenin merkezine yerleştiren esnek bir örüntü sunar. Diyetin temelini tam tahıllar, sebze ve meyveler, kurubaklagiller, yağlı tohumlar ve doymamış bitkisel yağlar oluştururken; kırmızı et, işlenmiş et, rafine tahıllar, eklenmiş şekerler ve doymuş yağdan zengin besinler belirgin biçimde sınırlandırılır. Hayvansal kaynaklı besinler tamamen dışlanmaz; süt ürünleri, yumurta, balık, tavuk ve kırmızı et ölçülü miktarlarda yer alabilir. Bu nedenle Gezegenel Sağlık Diyeti, tek tip bir liste olmaktan çok farklı coğrafyalara, kültürel yapılar, tarımsal üretim koşullarına ve sosyoekonomik düzeylere uyarlanabilecek esnek bir referans model olarak değerlendirilmelidir (Willett ve ark., 2019; Dernini ve ark., 2017; FAO & WHO, 2019).

Gezegenel Sağlık Diyeti'nin metabolik sağlık açısından temel üstünlüğü, minimum işlenmiş bitkisel besinlere ve yüksek posa içeriğine dayanmasıdır. Tam tahıllar, sebze, meyve ve kurubaklagillerden sağlanan posa; glisemik yanıtın düzenlenmesine, tokluk hissinin artmasına, vücut ağırlığının kontrolüne ve bağırsak mikrobiyotasının desteklenmesine katkı sağlayabilir. Kurubaklagiller ve yağlı tohumlar ise bitkisel protein, magnezyum, potasyum, doymamış yağ asitleri ve biyoaktif bileşenler açısından önemli kaynaklardır. Kırmızı ve işlenmiş et tüketiminin azaltılması doymuş yağ ve bazı proinflatuvar bileşenlerin alımını sınırlarken; sebze, meyve, tam tahıl ve yağlı tohum tüketiminin artırılması antioksidan, polifenol ve mikro besin ögesi çeşitliliğini destekleyebilir (Willett ve ark., 2019; Afshin ve ark., 2019; Clark ve ark., 2019).

Bu diyetin kardiyometabolik hastalıklara karşı koruyucu potansiyeli, bitkisel ağırlıklı beslenme örüntülerine ilişkin kanıtlarla uyumludur. Bitkisel besinlerin artırılması ve kırmızı/işlenmiş et tüketiminin azaltılması; obezite, tip 2 diyabet, kardiyovasküler

hastalıklar ve bazı kanser türleri açısından daha düşük riskle ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte modelin sağlık etkisi yalnızca “bitkisel” olmasına değil, diyetin besin kalitesine bağlıdır. Rafine tahıllar, yüksek nişastalı ürünler, şekerli gıdalar veya ultra işlenmiş bitkisel ürünlerle uygulanan bir örüntüde beklenen metabolik kazanımlar azalabilir. Bu nedenle PHD’nin sağlıklı biçimde uygulanabilmesi için tam tahıllar, kurubaklagiller, sebze, meyve, yağlı tohumlar ve minimum işlenmiş bitkisel besinler temel alınmalıdır (Satija ve ark., 2017; Willett ve ark., 2019; Bui ve ark., 2024).

Gezegensel Sağlık Diyeti’ni diğer popüler diyet modellerinden ayıran temel özellik, bireysel sağlık çıktıları ile çevresel göstergeleri aynı çerçevede değerlendirmesidir. Geleneksel diyet yaklaşımları çoğunlukla ağırlık kaybı, glisemik kontrol, lipid profili veya kardiyovasküler risk üzerine yoğunlaşırken; EAT-Lancet modeli sera gazı emisyonu, arazi kullanımı, su tüketimi, biyolojik çeşitlilik kaybı ve gıda üretim sistemlerinin gezegensel sınırlar üzerindeki etkisini de dikkate almaktadır (Willett ve ark., 2019; Springmann ve ark., 2018; Rockström ve ark., 2009). Modelin çevresel avantajı özellikle kırmızı ve işlenmiş et tüketiminin azaltılmasından kaynaklanmaktadır. Kırmızı et üretimi, metan emisyonları, yem üretimi, arazi gereksinimi, su kullanımı ve gübre yönetimi nedeniyle çevresel yükü yüksek bir üretim alanıdır. Buna karşılık kurubaklagiller, tam tahıllar, sebze ve meyveler gibi bitkisel kaynaklı besinler genellikle daha düşük sera gazı emisyonu ve daha verimli kaynak kullanımıyla ilişkilidir (Poore & Nemecek, 2018; Aleksandrowicz ve ark., 2016; Clark ve ark., 2019).

Bununla birlikte PHD’nin çevresel etkisi yalnızca karbon emisyonu üzerinden değerlendirilmemelidir. Bazı bitkisel ürünlerde yüksek su kullanımı, pestisit ve gübre girdileri, mevsim dışı üretim, soğuk zincir gereksinimi ve uzun mesafeli taşımacılık çevresel yükü artırabilir. Bu nedenle modelin çevresel açıdan en güçlü biçimi; yerel, mevsimsel, minimum işlenmiş, kimyasal girdi düzeyi

azaltılmış ve agroekolojik üretim ilkeleriyle desteklenen besinlere dayanmalıdır. Sürdürülebilir sağlıklı diyet ilkeleri de beslenme modellerinin yalnızca sağlık ve çevre etkileriyle değil; kültürel kabul edilebilirlik, ekonomik erişilebilirlik, güvenilirlik ve yerel gıda sistemlerine uygunluk açısından da ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (FAO & WHO, 2019; Springmann ve ark., 2018; Poore & Nemecek, 2018).

Gezegensel Sağlık Diyeti'nin esnek ve uyarlanabilir yapısı önemli bir avantajdır. Hayvansal besinleri tamamen dışlamaması, vegan veya vejetaryen beslenmeye geçmekte zorlanan bireyler ve toplumlar için daha uygulanabilir bir ara model sunabilir. Kırmızı et tüketiminin azaltılması, kurubaklagil tüketiminin artırılması, rafine tahıllar yerine tam tahılların seçilmesi ve sebze-meyve tüketiminin yükseltilmesi gibi kademeli değişiklikler, modelin toplum düzeyinde benimsenmesini kolaylaştırabilir (Willett ve ark., 2019; FAO & WHO, 2019; Springmann ve ark., 2018). Ancak modelin küresel bir referans diyet olarak tasarlanması, her ülkenin beslenme kültürüne, tarımsal üretim kapasitesine, gıda fiyatlarına ve ekonomik koşullarına doğrudan uyarlanmasını zorlaştırabilir. Nitekim bazı analizler, EAT-Lancet referans diyetinin düşük gelirli gruplar için her zaman ekonomik olarak erişilebilir olmadığını göstermektedir (Hirvonen ve ark., 2020; FAO & WHO, 2019; Willett ve ark., 2019).

Modelin bir diğer sınırlılığı mikro besin ögesi yeterliliğidir. Hayvansal kaynaklı besinler tamamen dışlanmasa da düşük miktarlarda önerildiği için B12 vitamini, demir, çinko, kalsiyum ve bazı omega-3 yağ asitleri açısından dikkatli planlama gerekebilir. Özellikle çocuklar, gebeler, emziren kadınlar, yaşlı bireyler, düşük sosyoekonomik gruplar ve besin çeşitliliği sınırlı toplumlarda bu model bireyselleştirilmiş değerlendirme gerektirir. Bu eksikliklerin giderilmesi için zenginleştirme, destek kullanımı veya yerel besin kaynaklarına dayalı uyarlamalar gerekli olabilir (Beal ve ark., 2023; Hirvonen ve ark., 2020; FAO & WHO, 2019).

Sonuç olarak Gezegenel Sağlık Diyeti, insan sağlığı ile gezen sağlığını aynı düzlemde değerlendiren çağdaş ve disiplinler arası bir beslenme modelidir. Bitkisel kaynaklı besinleri öncelemesi, kırmızı ve işlenmiş etleri sınırlandırması, minimum işlenmiş gıdaları teşvik etmesi ve çevresel göstergeleri diyet planlamasına dahil etmesi bu modeli sürdürülebilir beslenme tartışmalarında önemli bir referans hâline getirmektedir. Ancak etkili uygulanabilmesi yalnızca bireysel tabak tercihleriyle değil; gıda fiyatları, üretim destekleri, sağlıklı gıdaya erişim, okul ve kurum beslenmesi, gıda kaybı ve israfının azaltılması, sürdürülebilir üretim politikaları ve yerel gıda kültürlerine uyarlama ile mümkündür (Springmann ve ark., 2018; Willett ve ark., 2019; UNEP, 2024). Bu nedenle PHD, tek başına bireysel bir diyet reçetesi değil; sağlıklı, adil ve sürdürülebilir gıda sistemlerine geçiş için yol gösterici bir çerçeve olarak değerlendirilmelidir (Willett ve ark., 2019; Beal ve ark., 2023; FAO & WHO, 2019).

Ketojenik Diyet

Ketojenik diyet, karbonhidrat alımının belirgin biçimde kısıtlandığı, yağ alımının artırıldığı ve proteinin genellikle orta düzeyde tutulduğu düşük karbonhidratlı-yüksek yağlı bir beslenme modelidir. Diyetin temel metabolik amacı, glikoz kullanımını azaltarak karaciğerde yağ asitlerinden keton cisimciklerinin üretimini artırmak ve organizmayı ketozis durumuna yönlendirmektir. Klasik ketojenik diyetle günlük karbonhidrat alımı çoğunlukla 20–50 g ile sınırlandırılırken, enerjinin büyük bölümü yağlardan sağlanır ve protein alımı ketozisi bozmayacak düzeyde planlanır. Tarihsel olarak ilaca dirençli epilepsi tedavisinde kullanılan bu diyet, günümüzde obezite, tip 2 diyabet, insülin direnci ve bazı nörolojik ya da metabolik hastalıklar açısından da tartışılmaktadır. Ancak terapötik ketojenik diyet ile popüler ve kontrolsüz uygulamalar birbirinden ayrılmalı; klinik uygulamaların uzman gözetimi, bireyselleştirilmiş planlama ve biyokimyasal izlem

gerektirdiği unutulmamalıdır (Kossoff ve ark., 2018; Ruan ve ark., 2022; Paoli ve ark., 2013). Ketojenik diyetin besin örüntüsü genellikle et, yumurta, balık, peynir, tereyağı, krema, zeytinyağı, avokado, yağlı tohumlar ve düşük karbondhidratlı sebzelerden oluşur. Buna karşılık tahıllar, kurubaklagiller, nişastalı sebzeler, şekerli besinler ve birçok meyve türü sınırlandırılır. Bu durum diyetin yalnızca makro besin ögesi dağılımını değil; posa alımını, mikro besin ögesi yeterliliğini, besin çeşitliliğini ve bağırsak mikrobiyotasını da etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca ketojenik diyetin sağlık etkileri yalnızca karbondhidrat miktarına değil; yağın türüne, protein kaynağına, sebze çeşitliliğine, posa içeriğine ve genel besin kalitesine bağlıdır. Zeytinyağı, avokado, yağlı tohumlar ve sebzelerle planlanan bir ketojenik diyet ile işlenmiş et, tereyağı, krema ve yüksek doymuş yağ içeren bir uygulamanın metabolik sonuçları aynı değildir (Paoli ve ark., 2013; Chawla ve ark., 2020; Joo ve ark., 2023). Ketojenik diyetin metabolik etkileri çoğunlukla vücut ağırlığı, glisemik kontrol ve lipid profili üzerinden değerlendirilmektedir. Karbondhidrat alımının azaltılması, özellikle ilk dönemde insülin düzeylerinde düşüşe, glikojen depolarında azalmaya ve buna bağlı su kaybına yol açarak hızlı ağırlık kaybı izlenimi oluşturabilir. Daha uzun dönemde ise enerji alımındaki azalma, protein ve yağın tokluk sağlayıcı etkisi, karbondhidratlı besinlerin sınırlandırılması ve keton cisimciklerinin iştah üzerindeki olası etkileri ağırlık kaybına katkıda bulunabilir. Meta-analizlerde düşük karbondhidratlı diyetlerin kısa ve orta vadede vücut ağırlığı, trigliserit ve HDL-kolesterol üzerinde olumlu etkiler sağlayabildiği; ancak uzun dönem sürdürülebilirlik ve kardiyovasküler güvenlik açısından dikkatli değerlendirme gerektiği bildirilmektedir (Mansoor ve ark., 2016; Chawla ve ark., 2020; Dong ve ark., 2020). Tip 2 diyabet ve insülin direnci açısından ketojenik diyetin temel etkisi karbondhidrat yükünü azaltmasıdır. Karbondhidrat kısıtlaması postprandiyal glisemik dalgalanmaları azaltabilir ve bazı bireylerde HbA1c, açlık glukozu, insülin düzeyi,

trigliserit ve vücut ağırlığında iyileşmeler sağlayabilir. Bununla birlikte bu etkiler yalnızca ketozisle açıklanamamalıdır; toplam enerji alımındaki azalma, ağırlık kaybı, ilaç dozlarındaki değişiklikler ve bireyin başlangıç metabolik durumu da sonuçları belirler. Düşük ve çok düşük karbonhidratlı diyetlerin kısa dönemde glisemik kontrolü destekleyebileceği, ancak bu yararların 12 ay ve sonrasında azalabileceği bildirilmektedir (Goldenberg ve ark., 2021; Ghasemi ve ark., 2024; Tian ve ark., 2025). Ketojenik diyetin lipid profili üzerindeki etkileri tartışmalıdır. Bazı çalışmalarda trigliserit düzeylerinde azalma ve HDL-kolesterolde artış bildirilirken, özellikle doymuş yağ içeriği yüksek uygulamalarda LDL-kolesterol, total kolesterol ve apolipoprotein B düzeylerinde artış görülebilmektedir. Bu nedenle lipid profili, kardiyovasküler risk öyküsü ve yağ kaynaklarının niteliği mutlaka izlenmelidir (Chawla ve ark., 2020; Joo ve ark., 2023; Burén ve ark., 2021). Ayrıca tahıllar, kurubaklagiller, meyveler ve nişastalı sebzelerin sınırlandırılması posa, B grubu vitaminleri, potasyum, magnezyum ve fitokimyasal alımını azaltabilir. Düşük posa alımı kabızlık, mikrobiyota çeşitliliğinde azalma ve uzun dönem bağırsak sağlığı açısından risk oluşturabilir. Ailesel hiperkolesterolemi, kardiyovasküler hastalık, böbrek veya karaciğer hastalığı, pankreatit, gebelik, emzirme, çocukluk ve ergenlik döneminde ketojenik diyet uzman kontrolü olmadan uygulanmamalıdır. Epilepsi alanında ise nöbet sıklığını azaltmada etkili olabilse de gastrointestinal sorunlar, büyüme-gelişme, lipid değişiklikleri ve vitamin-mineral yetersizlikleri açısından izlem gerektirir (Kossoff ve ark., 2018; Mahmoud ve ark., 2019; Ruan ve ark., 2022). Çevresel sürdürülebilirlik açısından ketojenik diyetin etkisi, uygulanan besin örüntüsüne bağlıdır. Popüler uygulamalar çoğu zaman et, yumurta, peynir, tereyağı, krema ve yüksek yağlı süt ürünlerine ağırlık verdiğinden, özellikle kırmızı et ve yüksek yağlı süt ürünleri tüketimi arttığında sera gazı emisyonu, arazi kullanımı ve su tüketimi açısından çevresel yük artabilir. Çalışmalarda ketojenik

diyetin vegan, vejetaryen ve pesketaryen modellere kıyasla daha yüksek karbon ayak izine ve daha düşük diyet kalitesi puanlarına sahip olabildiği bildirilmiştir (O'Malley ve ark., 2023; Poore & Nemecek, 2018; Clark ve ark., 2019). Hayvansal yağ ve proteinlerin yoğun kullanımı bu yükü artırırken; zeytinyağı, yağlı tohumlar, avokado, düşük karbonhidratlı sebzeler ve sınırlı miktarda sürdürülebilir deniz ürünleriyle planlanan uygulamalar çevresel etkiyi kısmen azaltabilir. Ancak tahıl ve kurubaklagil gibi düşük çevresel etkiye sahip bitkisel kaynakların dışlanması, sürdürülebilirlik potansiyelini sınırlar (Aleksandrowicz ve ark., 2016; FAO & WHO, 2019; Willett ve ark., 2019). Sonuç olarak ketojenik diyet, kısa dönemde ağırlık kaybı, iştah kontrolü, trigliserit düzeylerinde azalma ve glisemik kontrolde iyileşme sağlayabilen bir modeldir. Bununla birlikte uzun dönem sürdürülebilirlik, besin ögesi yeterliliği, LDL-kolesterol yanıtı, bağırsak sağlığı, kardiyovasküler güvenlik ve çevresel etki açısından önemli sınırlılıklar taşır. Bu nedenle genel toplum için uzun dönemli ve çevresel açıdan ideal bir beslenme modeli olarak değil; belirli klinik hedefler doğrultusunda, bireyselleştirilmiş tıbbi beslenme tedavisi kapsamında ve uzman kontrolüyle uygulanabilecek sınırlı bir araç olarak değerlendirilmelidir (Chawla ve ark., 2020; Ghasemi ve ark., 2024; O'Malley ve ark., 2023).

Paleo Diyet

Paleo diyet, modern insan metabolizmasının tarım öncesi dönemdeki avcı-toplayıcı beslenme örüntülerine daha uyumlu olduğu varsayımına dayanan bir beslenme modelidir. Bu yaklaşımda tahıllar, kurubaklagiller, süt ürünleri, rafine şekerler, ultra işlenmiş besinler ve bazı endüstriyel yağlar, tarım devrimi ve endüstrileşme sonrasında insan beslenmesine giren bileşenler olarak değerlendirilir. Diyetin temelini et, balık, yumurta, sebzeler, meyveler, yağlı tohumlar, kök sebzeler ve işlenmemiş yağ

kaynakları oluşturur. Bununla birlikte günümüzde uygulanan Paleo diyet, Paleolitik dönemdeki beslenmenin birebir yeniden yapılandırılması değil; işlenmemiş besinleri öne çıkaran, rafine karbonhidratları ve endüstriyel ürünleri sınırlandıran modern bir yorumdur (Eaton & Konner, 1985; Cordain ve ark., 2005; Manheimer ve ark., 2015). Paleo diyet tek tip bir model değildir; uygulama biçimi bireyler arasında önemli ölçüde değişebilir. Bazı uygulamalar kırmızı et ve hayvansal yağ ağırlıklı iken, bazıları sebze, meyve, balık, yumurta, yağlı tohumlar ve doymamış yağ kaynaklarını daha fazla içeren dengeli bir yapı gösterebilir. Paleo diyet düşük karbonhidratlı diyetlerle benzer yönler taşısa da ketojenik diyetle aynı değildir. Ketojenik diyetle temel hedef ketozis oluşturmak iken, Paleo diyetle amaç işlenmemiş ve “ataların beslenme örüntüsüne benzer” kabul edilen besinleri tercih etmektir. Bu nedenle Paleo diyetle meyveler, kök sebzeler ve bazı nişastalı sebzeler yer alabildiğinden karbonhidrat miktarı daha değişkendir (Cordain ve ark., 2005; Frączek ve ark., 2021; Jamka ve ark., 2020). Paleo diyetin metabolik etkileri çoğunlukla vücut ağırlığı, bel çevresi, kan basıncı, glisemik kontrol, lipid profili ve metabolik sendrom bileşenleri üzerinden incelenmiştir. Rafine şekerlerin, işlenmiş tahılların, paketli atıştırma ürünlerinin ve ultra işlenmiş ürünlerin diyetten çıkarılması toplam enerji alımını azaltarak ağırlık kaybını destekleyebilir. Ayrıca sebze, meyve, yağlı tohumlar ve kaliteli protein kaynaklarının artırılması tokluk yanıtını güçlendirebilir ve glisemik kontrolü olumlu etkileyebilir. Sistematik derleme ve meta-analizlerde Paleo diyetin kısa dönemde vücut ağırlığı, bel çevresi, kan basıncı, trigliserit düzeyi ve bazı glisemik göstergeler üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceği bildirilmiştir (Manheimer ve ark., 2015; Ghaedi ve ark., 2019; de Menezes ve ark., 2019). Bununla birlikte mevcut kanıtların önemli bir bölümü kısa süreli ve sınırlı örneklemli çalışmalara dayanmaktadır. Uzun dönem kardiyovasküler olaylar, tip 2 diyabet insidansı, mortalite, böbrek sağlığı ve sürdürülebilir ağırlık kaybı üzerindeki etkilerine ilişkin

kanıtlar henüz yeterli değildir (Jönsson ve ark., 2009; Jamka ve ark., 2020; Frączek ve ark., 2021). Paleo diyetin olası yararları büyük ölçüde modern Batı tipi beslenmede sık görülen rafine karbonhidratların, eklenmiş şekerlerin ve ultra işlenmiş ürünlerin azaltılmasına bağlı olabilir. Bu yönüyle diyet, bireyleri minimum işlenmiş besinlere yönlendirmesi açısından davranışsal bir avantaj sağlayabilir. Ancak bu olumlu etkilerin Paleo diyetin tüm dışlayıcı ilkelerinden mi, yoksa genel olarak ultra işlenmiş besinlerin azaltılmasından mı kaynaklandığı dikkatle değerlendirilmelidir (Cordain ve ark., 2005; Manheimer ve ark., 2015; Reynolds ve ark., 2019). Paleo diyetin temel sınırlılığı ise tam tahıllar, kurubaklagiller ve süt ürünleri gibi besleyici gıda gruplarını dışlamasıdır. Tam tahıllar ve kurubaklagiller posa, bitkisel protein, magnezyum, folat, potasyum ve fitokimyasallar açısından; süt ürünleri ise kalsiyum ve D vitamini açısından önemli kaynaklardır. Bu nedenle Paleo diyetin besin ögesi yeterliliği özellikle kadınlar, çocuklar, adolesanlar, yaşlılar ve kemik sağlığı açısından risk taşıyan bireylerde dikkatle izlenmelidir (Reynolds ve ark., 2019; Frączek ve ark., 2021; FAO & WHO, 2019). Paleo diyetin tarihsel dayanağı da eleştirel değerlendirilmelidir. Paleolitik dönemde tek ve standart bir beslenme modeli bulunmamaktadır; beslenme örüntüleri coğrafya, iklim, mevsim, bitki örtüsü ve besine erişime göre değişmiştir. Ayrıca günümüzde tüketilen et, sebze, meyve ve yağ kaynakları Paleolitik dönemdeki yabani besinlerle aynı özelliklere sahip değildir. Bu nedenle Paleo diyet, evrensel bir ata diyeti olarak değil, modern koşullara uyarlanmış bir beslenme modeli olarak ele alınmalıdır (Eaton & Konner, 1985; Eaton ve ark., 1997; Cordain ve ark., 2005). Çevresel sürdürülebilirlik açısından Paleo diyet, bitkisel ağırlıklı modellere kıyasla daha tartışmalıdır. Tahıl ve kurubaklagil gibi düşük çevresel etkiye sahip besinlerin dışlanması; buna karşılık et, balık, yumurta ve diğer hayvansal ürünlerin daha fazla kullanılması karbon ayak izini artırabilir. Özellikle kırmızı et tüketimi metan emisyonu, arazi kullanımı, su tüketimi ve ekolojik

yük açısından önemli bir risk oluşturur. Çalışmalarda Paleo diyetin vegan ve vejetaryen modellere göre daha yüksek karbon ayak izine sahip olabildiği bildirilmiştir (O'Malley ve ark., 2023; Aleksandrowicz ve ark., 2016; Clark ve ark., 2019; Poore & Nemecek, 2018; Tilman & Clark, 2014). Kırmızı ve işlenmiş etlerin sınırlandırılması, sebze-meyve çeşitliliğinin artırılması, sürdürülebilir balıkçılık ürünlerinin tercih edilmesi, yerel ve mevsimsel ürünlere yönelinmesi çevresel yükü azaltabilir; ancak tahıl ve kurubaklagillerin dışlanması sürdürülebilirlik açısından önemli bir sınırlılık oluşturmaya devam eder (FAO & WHO, 2019; Willett ve ark., 2019; Aleksandrowicz ve ark., 2016). Sonuç olarak Paleo diyet; rafine şekerleri, ultra işlenmiş besinleri ve düşük besin değerine sahip paketli ürünleri azaltması nedeniyle kısa dönemde bazı metabolik yararlar sağlayabilir. Ancak tam tahıllar, kurubaklagiller ve süt ürünlerini dışlaması; uzun dönem besin ögesi yeterliliği, kardiyometabolik güvenlik, ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından sınırlılıklar oluşturmaktadır. Bu nedenle Paleo diyet genel toplum için evrensel ve uzun dönemli ideal bir model olarak değil; dikkatli planlandığında, bireysel gereksinimler gözetildiğinde ve uygun izlem sağlandığında uygulanabilecek sınırlı bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir (Manheimer ve ark., 2015; Ghaedi ve ark., 2019; O'Malley ve ark., 2023).

Atkins Diyeti

Atkins diyeti, düşük karbonhidratlı beslenme yaklaşımları arasında en yaygın bilinen modellerden biridir. Dr. Robert C. Atkins tarafından geliştirilen bu yaklaşım, karbonhidrat alımının azaltılması; protein ve yağ alımının ise görece artırılması ilkesine dayanır. Ketojenik diyetle benzer şekilde karbonhidrat kısıtlamasını merkeze alsa da klasik ketojenik diyetten farklı olarak daha esnek ve aşamalı bir yapı gösterir. Başlangıç evresinde karbonhidrat alımı

belirgin biçimde sınırlandırılırken, ilerleyen evrelerde bireyin ağırlık kaybı, metabolik yanıtı ve karbonhidrat toleransına göre karbonhidrat miktarı kontrollü olarak artırılır. Bu nedenle Atkins diyeti, ketozisin sürekli sürdürülmesini hedefleyen katı bir modelden çok, ağırlık kaybı ve ağırlık koruma sürecine göre düzenlenen düşük karbonhidratlı bir beslenme stratejisi olarak değerlendirilmelidir (Atkins, 2002; Gardner ve ark., 2007; Foster ve ark., 2010; Shai ve ark., 2008). Atkins diyetinde ekmek, makarna, pirinç, patates, rafine tahıllar, şekerli besinler ve tatlılar büyük ölçüde sınırlandırılırken; et, tavuk, balık, yumurta, peynir, yağlar, düşük karbonhidratlı sebzeler ve bazı yağlı tohumlar daha serbest tüketilebilmektedir. Bununla birlikte diyetin sağlık etkileri yalnızca karbonhidrat miktarıyla açıklanamaz. Yağ kaynaklarının niteliği, protein seçimi, sebze ve posa alımı, işlenmiş et tüketimi ve toplam enerji dengesi metabolik sonuçları belirleyen temel faktörlerdir. Bu nedenle zeytinyağı, avokado, yağlı tohumlar, balık ve düşük karbonhidratlı sebzelerle yapılandırılan bir Atkins modeli ile kırmızı et, işlenmiş et, tereyağı ve yüksek yağlı süt ürünlerine dayalı bir uygulamanın aynı sağlık etkilerini göstermesi beklenmez (Stern ve ark., 2004; Chawla ve ark., 2020; Hu ve ark., 2014). Atkins diyetinin metabolik etkileri çoğunlukla vücut ağırlığı, glisemik kontrol, trigliserit, HDL-kolesterol ve LDL-kolesterol düzeyleri üzerinden değerlendirilmiştir. Karbonhidrat kısıtlaması, özellikle rafine karbonhidrat ve eklenmiş şeker tüketimi yüksek bireylerde enerji alımını azaltabilir, insülin yanıtını düşürebilir ve kısa dönemde hızlı ağırlık kaybını destekleyebilir. İlk haftalardaki ağırlık azalmasının bir kısmı glikojen depolarının azalmasına bağlı sıvı kaybından kaynaklanırken, uzun dönemde enerji kısıtlaması, protein alımının tokluk etkisi ve karbonhidratlı besinlerin sınırlandırılması ön plana çıkmaktadır. Randomize kontrollü çalışmalar, Atkins ve benzeri düşük karbonhidratlı diyetlerin kısa dönemde bazı düşük yağlı diyetlere kıyasla daha fazla kilo kaybı sağlayabildiğini; ancak uzun dönem başarının büyük ölçüde diyet uyumu ve toplam enerji

dengesiyle ilişkili olduğunu göstermektedir (Foster ve ark., 2003; Gardner ve ark., 2007; Foster ve ark., 2010; Gardner ve ark., 2018). Düşük karbonhidratlı diyetlere ilişkin meta-analizlerde bu modellerin kısa ve orta vadede vücut ağırlığı, trigliserit düzeyi ve HDL-kolesterol üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceği bildirilmiştir. Ancak özellikle doymuş yağ içeriği yüksek uygulamalarda LDL-kolesterol ve total kolesterol düzeylerinde artış görülebilmesi kardiyometabolik açıdan dikkat gerektirir. Tip 2 diyabet ve insülin direnci olan bireylerde karbonhidrat yükünün azaltılması postprandiyal glukoz dalgalanmalarını sınırlayabilir; bazı bireylerde HbA1c, açlık glukozu, insülin düzeyi ve vücut ağırlığında iyileşmeler oluşturabilir. Bununla birlikte bu etkiler yalnızca karbonhidrat kısıtlamasına değil; enerji alımındaki azalma, ağırlık kaybı, ilaç değişiklikleri ve bireysel metabolik yanıt da bağlıdır. Bu nedenle diyabetli bireylerde, özellikle insülin veya insülin salgılatıcı ilaç kullanımı varsa, Atkins diyeti hekim ve diyetisyen gözetiminde uygulanmalıdır (Mansoor ve ark., 2016; Dong ve ark., 2020; Chawla ve ark., 2020; Goldenberg ve ark., 2021; Shai ve ark., 2008). Atkins diyetinin önemli sınırlılıkları bulunmaktadır. Özellikle erken evrelerde tahıllar, kurubaklagiller, birçok meyve ve nişastalı sebzelerin sınırlandırılması; posa, B grubu vitaminleri, folat, potasyum, magnezyum ve fitokimyasal alımını azaltabilir. Bu durum kabızlık, bağırsak mikrobiyotasında olumsuz değişiklikler ve uzun dönem besin ögesi yetersizlikleri açısından risk oluşturabilir. Ayrıca hayvansal protein ve doymuş yağ ağırlıklı uygulamalar bazı bireylerde LDL-kolesterol artışı ve kardiyovasküler risk açısından olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle sebze çeşitliliği, doymamış yağ kaynakları, yeterli sıvı alımı, posa desteği ve düzenli biyokimyasal izlem Atkins diyetinin güvenli uygulanması açısından önemlidir (Chawla ve ark., 2020; Goldenberg ve ark., 2021; Reynolds ve ark., 2019). Çevresel sürdürülebilirlik açısından Atkins diyetinin etkisi, kullanılan protein ve yağ kaynaklarına bağlıdır. Geleneksel uygulamaların et, yumurta,

peynir ve diğ er hayvansal besinlere daha fazla yer vermesi; özellikle kırmızı et ve yüksek yağılı süt ürünleri tüketimi arttığında sera gazı emisyonu, arazi kullanımı, yem üretimi ve su tüketimi üzerinde daha yüksek baskı oluşturabilir. Yaşam döngüsü analizleri, kırmızı et ve süt ürünleri başta olmak üzere hayvansal kaynaklı besinlerin bitkisel kaynaklara kıyasla genellikle daha yüksek çevresel etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Poore & Nemecek, 2018; Clark ve ark., 2019; Aleksandrowicz ve ark., 2016). Ayrıca kurubaklagiller ve tam tahıllar gibi düşük çevresel etkiye sahip, ekonomik ve besleyici bitkisel kaynakların sınırlandırılması, diyetin hem besin çeşitliliğini hem de sürdürülebilirlik potansiyelini azaltmaktadır. Kırmızı ve işlenmiş etlerin azaltıldığı, balık ve yumurtanın ölçülü kullanıldığı, zeytinyağı, yağılı tohumlar, avokado ve düşük karbonhidratlı sebzelerin  ne çıkarıldığı uygulamalar çevresel yükü kısmen azaltabilir; ancak Atkins modeli Akdeniz, fleksitaryen veya Gezegenel Sağlık Diyeti kadar avantajlı kabul edilmemektedir (O'Malley ve ark., 2023; FAO & WHO, 2019; Willett ve ark., 2019; Aleksandrowicz ve ark., 2016). Sonuç olarak Atkins diyeti, kısa dönemde ağırlık kaybı, glisemik yanıtın iyileşmesi ve trigliserit düzeylerinde azalma sağlayabilen düşük karbonhidratlı bir yaklaşımdır. Ancak uzun dönem sürdürülebilirlik, posa ve mikro besin ögesi yeterliliği, LDL-kolesterol yanıtı, bağırsak sağlığı, kardiyovasküler güvenlilik ve çevresel y k açısından dikkatle değerlendirilmelidir. Bu nedenle Atkins diyeti genel toplum için uzun dönemli ideal bir model olarak değil; belirli bireylerde, kısa veya orta vadeli hedefler doğrultusunda, uzman kontrolünde ve besin kalitesi gözetilerek uygulanabilecek sınırlı bir beslenme yaklaşımı olarak ele alınmalıdır (Gardner ve ark., 2007; Chawla ve ark., 2020; O'Malley ve ark., 2023).

Vegan Diyet

Vegan diyet, et, tavuk, balık, yumurta, süt ürünleri, bal, jelatin ve diğer hayvansal bileşenlerin tamamen dışlandığı; sebzeler, meyveler, tam tahıllar, kurubaklagiller, yağlı tohumlar, tohumlar, bitkisel yağlar ve bitkisel bazlı alternatiflere dayanan bir beslenme modelidir. Bu yaklaşım yalnızca sağlık amacıyla değil; etik ilkeler, hayvan refahı, çevresel sürdürülebilirlik, dini/kültürel tercihler ve yaşam tarzı felsefesiyle de ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte vegan beslenmenin sağlık etkisi, hayvansal besinlerin çıkarılmasından çok, diyetin hangi bitkisel kaynaklarla ve ne ölçüde dengeli planlandığına bağlıdır. Tam tahıllar, kurubaklagiller, sebze, meyve, yağlı tohumlar ve minimum işlenmiş bitkisel besinlerle yapılandırılan vegan örüntüler; posa, polifenoller, antioksidan bileşikler, magnezyum, potasyum, folat ve doymamış yağ asitleri açısından zengin olabilir. Buna karşılık rafine tahıllar, şekerli ürünler, kızartmalar, bitkisel bazlı fast-food ürünleri ve ultra işlenmiş vegan atıştırmalıklara dayalı bir vegan diyet, hayvansal besin içermese de düşük beslenme kalitesine sahip olabilir. Bu nedenle vegan diyet değerlendirilirken yalnızca dışlanan besin grupları değil; besin çeşitliliği, protein kalitesi, mikro besin ögesi yeterliliği, posa içeriği, yağ asidi dengesi ve ultra işlenmiş ürün tüketimi birlikte ele alınmalıdır (Melina ve ark., 2016; Craig ve ark., 2021; Dinu ve ark., 2017; Satija ve ark., 2017). Uygun planlanan vegan diyetler, kardiyometabolik sağlık açısından önemli yararlar sağlayabilir. Hayvansal kaynaklı doymuş yağ alımının azalması ve bitkisel posa ile biyoaktif bileşen alımının artması; total kolesterol, LDL-kolesterol, kan basıncı, vücut ağırlığı ve glisemik kontrol üzerinde olumlu etkiler oluşturabilir. Gözlemsel çalışmalar ve meta-analizler, vegan ve vejetaryen beslenme örüntülerinin daha düşük beden kütle indeksi, kan basıncı ve bazı kardiyometabolik risk göstergeleriyle ilişkili olabileceğini göstermektedir. Ancak bu etkiler, diyetin sağlıklı bitkisel besinlere dayanması durumunda daha

belirgindir; beyaz unlu ürünler, şekerli içecekler, kızartılmış besinler ve ultra işlenmiş vegan alternatiflerin yüksek olduğu örüntülerde aynı metabolik avantajlar beklenmemelidir. Yüksek posa alımı tokluk hissini artırabilir, enerji yoğunluğunu azaltabilir, bağırsak mikrobiyotasını destekleyebilir ve kısa zincirli yağ asitlerinin üretimi yoluyla metabolik yanıtları olumlu etkileyebilir (Benatar & Stewart, 2018; Gibbs ve ark., 2021; Dinu ve ark., 2017; Reynolds ve ark., 2019; Satija ve ark., 2017; Craig ve ark., 2021). Vegan beslenmede en dikkatli değerlendirilmesi gereken konular protein yeterliliği ve mikro besin ögesi güvenliğidir. Kurubaklagiller, soya ürünleri, tam tahıllar, yağlı tohumlar ve tohumlar uygun şekilde bir araya getirildiğinde protein gereksinimi karşılanabilir; ancak tek yönlü veya enerji açısından yetersiz planlanan diyetlerde protein alımı ve amino asit dengesi sorun oluşturabilir. Bu durum özellikle gebeler, emziren kadınlar, çocuklar, adölesanlar, yaşlı bireyler ve sporcularda daha önemlidir. Vegan diyetin en kritik sınırlılıklarından biri B12 vitamini yetersizliği riskidir; çünkü B12 vitamini güvenilir biçimde esas olarak hayvansal besinlerden sağlanır. Bu nedenle vegan bireylerde B12 takviyesi veya B12 ile zenginleştirilmiş ürün kullanımı gerekli kabul edilmektedir. Ayrıca D vitamini, kalsiyum, iyot, demir, çinko, selenyum ve uzun zincirli omega-3 yağ asitleri de izlenmesi gereken besin öğeleridir. Bu nedenle vegan diyet, özellikle yaşam döngüsünün hassas dönemlerinde bireyselleştirilmiş değerlendirme ve gerektiğinde destek kullanımıyla sürdürülmelidir (Melina ve ark., 2016; Craig ve ark., 2021; Bakaloudi ve ark., 2021; Neufingerl & Eilander, 2021). Vegan diyetin önemli üstünlüklerinden biri, kırmızı ve işlenmiş etlerin diyetten çıkarılması ve bitkisel besinlerin yüksek oranda tüketilmesidir. Bu durum doymuş yağ alımını azaltırken posa, antioksidan ve fitokimyasal alımını artırabilir. Ayrıca vegan beslenme, hayvansal üretime bağlı çevresel yükün azaltılması bakımından güçlü bir potansiyele sahiptir. Bitkisel temelli diyetlere geçişin sera gazı emisyonu, arazi kullanımı, ötrofikasyon ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki baskıyı

azaltılabileceği bildirilmektedir. Büyük ölçekli çalışmalar ve yaşam döngüsü analizleri, vegan diyetlerin özellikle yüksek et tüketen diyetlere kıyasla daha düşük çevresel etki oluşturduğunu göstermektedir (Aleksandrowicz ve ark., 2016; Clark ve ark., 2019; Scarborough ve ark., 2023; Poore & Nemecek, 2018). Bununla birlikte vegan diyetin çevresel avantajı tüm uygulamalar için aynı değildir. Uzak mesafeden taşınan egzotik ürünler, yoğun su kullanımı gerektiren bitkisel besinler, sera üretimi, yüksek ambalajlı ultra işlenmiş vegan ürünler ve mevsim dışı tüketim çevresel yükü artırabilir. Ayrıca günümüzde yaygınlaşan vegan tatlılar, şekerli içecekler, yüksek tuzlu atıştırmalıklar ve ultra işlenmiş bitkisel alternatifler; sodyum, rafine karbonhidrat, enerji yoğunluğu ve düşük mikro besin ögesi içeriği açısından olumsuz bir örüntü oluşturabilir. Bu nedenle sağlıklı ve sürdürülebilir vegan beslenme; yerel, mevsimsel, minimum işlenmiş, kurubaklagil ve tam tahıl ağırlıklı, yeterli protein içeren ve gerektiğinde zenginleştirilmiş ya da takviyeli ürünlerle desteklenen bir model olarak planlanmalıdır. Vegan diyet önerileri yalnızca çevresel etki üzerinden değil; beslenme yeterliliği, kültürel kabul edilebilirlik, ekonomik erişilebilirlik, güvenlik ve bireyin yaşam döngüsü gereksinimleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir (Satija ve ark., 2017; Craig ve ark., 2021; Monteiro ve ark., 2019; FAO & WHO, 2019; Scarborough ve ark., 2023; Hirvonen ve ark., 2020). Sonuç olarak vegan diyet, doğru planlandığında kardiyometabolik sağlık ve çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü potansiyel taşıyan bir beslenme modelidir. Yüksek posa, antioksidan ve fitokimyasal içeriği; kırmızı ve işlenmiş etlerin dışlanması; doymuş yağ alımının azalması ve hayvansal üretime bağlı çevresel yükün düşmesi temel avantajlarıdır. Ancak bu modelin sağlıklı olabilmesi için yeterli protein alımı sağlanmalı, B12 başta olmak üzere kritik mikro besin ögeleri güvence altına alınmalı, ultra işlenmiş vegan ürünlerden kaçınılmalı ve bireyin yaş, sağlık durumu, sosyoekonomik koşulları ve kültürel bağlamı dikkate alınmalıdır. Bu nedenle vegan diyet,

yalnızca hayvansal besinlerin çıkarıldığı bir yaklaşım değil; besin kalitesi, destek kullanımı ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle birlikte planlanması gereken kapsamlı bir beslenme modelidir (Melina ve ark., 2016; Bakaloudi ve ark., 2021; Scarborough ve ark., 2023).

Vejetaryen Diyet

Vejetaryen diyet, temel olarak et, tavuk ve balık tüketiminin diyetten çıkarıldığı; bununla birlikte tercih edilen alt tipe göre süt ürünleri ve/veya yumurtanın beslenmede yer alabildiği bitkisel ağırlıklı bir beslenme örüntüsüdür. Bu yönüyle vejetaryen beslenme, tüm hayvansal kaynaklı besinleri dışlayan vegan diyetten ayrılmaktadır. Lakto-ovo vejetaryen modelde hem süt ürünleri hem de yumurta tüketilebilirken, lakto-vejetaryen beslenmede yumurta diyetten çıkarılır ve süt ürünleri korunur. Ovo-vejetaryen modelde ise yumurta tüketimi devam ederken süt ve süt ürünleri sınırlandırılır ya da tamamen çıkarılır. Dolayısıyla vejetaryen beslenme, tek tip bir diyet modeli olmaktan ziyade, hayvansal kaynaklı besinlerin kullanım düzeyine göre farklılaşan esnek bir beslenme yaklaşımıdır. Bu beslenme modelinin temelini sebzeler, meyveler, tam tahıllar, kurubaklagiller, yağlı tohumlar, tohumlar ve alt tipe bağlı olarak süt ürünleri ile yumurta oluşturmaktadır. Uygun şekilde planlandığında vejetaryen diyetler; posa, kompleks karbonhidratlar, bitkisel proteinler, vitaminler, mineraller ve fitokimyasallar açısından zengin bir beslenme yapısı sağlayabilmektedir. Diyetin besin çeşitliliği, yeterli enerji ve protein içeriği, mikro besin ögesi dengesi ve işlenmiş ürün tüketiminin sınırlılığı, bu modelin sağlık üzerindeki etkisini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır (Melina ve ark., 2016). Literatürde vejetaryen diyetlerin daha düşük beden kütle indeksi, daha olumlu serum lipid profili, daha düşük kan basıncı ve azalmış kardiyometabolik risk ile ilişkili olabileceği bildirilmektedir. Bu olumlu etkilerin ortaya çıkmasında kırmızı ve işlenmiş et tüketiminin sınırlandırılması, doymuş yağ alımının

azalması ve bitkisel kaynaklı besinlerin daha fazla tüketilmesi önemli rol oynamaktadır. Özellikle sebze, meyve, tam tahıl ve kurubaklagil tüketiminin artması; posa, antioksidan bileşikler ve biyoaktif fitokimyasalların alımını destekleyerek metabolik sağlık üzerinde koruyucu etkiler oluşturabilmektedir. Nitekim sistematik derleme ve meta-analizlerde vejetaryen beslenmenin iskemik kalp hastalığı riski ve bazı kronik hastalık göstergeleri açısından olumlu sonuçlarla ilişkili olduğu gösterilmiştir (Dinu ve ark., 2017; Dybvik ve ark., 2022). Vejetaryen beslenme, özellikle lakto-ovo formda uygulandığında vegan diyetle kıyasla bazı besin öğelerinin karşılanması açısından daha avantajlı olabilir. Süt ürünleri kalsiyum, riboflavin ve B12 vitamini alımına katkı sağlarken; yumurta yüksek biyolojik değere sahip protein, kolin ve bazı mikro besin öğeleri bakımından önemli bir kaynak niteliğindedir. Buna rağmen vejetaryen bireylerde demir, çinko, B12 vitamini, D vitamini ve uzun zincirli omega-3 yağ asitleri açısından beslenmenin dikkatle planlanması gerekmektedir. Bitkisel kaynaklı demirin biyoyararlılığının hem demire kıyasla daha düşük olması, özellikle demir gereksinimi artmış bireylerde önemli bir sınırlılık oluşturabilir (Melina ve ark., 2016). Vejetaryen diyetin güçlü yönleri arasında yüksek posa alımı, bitkisel besin çeşitliliğinin artması, kırmızı ve işlenmiş et tüketiminin azalması ve doymuş yağ alımının görece düşük olması yer almaktadır. Ayrıca süt ürünleri ve yumurtanın dahil edildiği vejetaryen modeller, bazı bireyler için vegan diyetle kıyasla sosyal, kültürel ve pratik açıdan daha sürdürülebilir olabilir. Ancak bu beslenme modelinin de her koşulda sağlıklı olduğu düşünülmemelidir. Rafine karbonhidratlar, şekerli ürünler, kızartılmış yiyecekler, yüksek yağ içeren atıştırmalıklar ve aşırı işlenmiş vejetaryen alternatiflerin sık tüketilmesi, diyet kalitesini belirgin biçimde düşürebilmektedir. Bu nedenle vejetaryen beslenmede temel hedef, hayvansal besinleri azaltmanın ötesinde; besin değeri yüksek, az işlenmiş ve dengeli bir örüntü oluşturmaktır.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde vejetaryen diyetler, omnivor ve özellikle et ağırlıklı beslenme modellerine kıyasla daha düşük çevresel yük oluşturma potansiyeline sahiptir. Kırmızı etin diyetten çıkarılması ya da belirgin şekilde azaltılması, sera gazı emisyonları, arazi kullanımı ve doğal kaynak tüketimi üzerinde olumlu etkiler sağlayabilir. Bitkisel protein kaynaklarının, özellikle kurubaklagillerin diyetle dahil edilmesi, hem beslenme kalitesi hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Poore & Nemecek, 2018; Willett ve ark., 2019). Bununla birlikte vejetaryen diyetin çevresel etkisi, diyetin içeriğine göre değişkenlik göstermektedir. Süt ürünleri ve yumurtanın yoğun tüketildiği bir vejetaryen model, tamamen bitkisel kaynaklara dayanan modellere kıyasla daha yüksek çevresel etki oluşturabilir. Bu nedenle çevresel açıdan daha uygun bir vejetaryen beslenme örüntüsü; kurubaklagiller, tam tahıllar, sebzeler, meyveler, yağlı tohumlar ve tohumların temel alındığı, süt ürünleri ve yumurtanın ise bireysel gereksinimler doğrultusunda ölçülü şekilde tüketildiği bir yapı üzerine kurulmalıdır. Sonuç olarak vejetaryen diyetler, iyi planlandığında hem insan sağlığını destekleyebilen hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilen önemli bir beslenme yaklaşımıdır. Ancak bu yararların ortaya çıkabilmesi, diyetin yalnızca et içermemesine değil; besin çeşitliliği, mikro besin ögesi yeterliliği, işlenmiş ürünlerin sınırlandırılması ve sürdürülebilir besin seçimlerinin önceliklendirilmesine bağlıdır.

Fleksitaryen Diyet

Fleksitaryen diyet, bitkisel kaynaklı besinleri beslenmenin merkezine yerleştiren; ancak hayvansal kaynaklı besinleri tamamen diyetten çıkarmayan bir beslenme yaklaşımıdır. “Flexible” ve “vegetarian” kelimelerinin birleşiminden oluşan bu kavram, temel olarak vejetaryen beslenmeye yakın bir model sunmakla birlikte,

bireyin belirli aralıklarla et, tavuk, balık, yumurta veya süt ürünleri tüketmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle fleksitaryen diyet, katı vejetaryen ya da vegan beslenme modellerinden farklı olarak, hayvansal kaynaklı besin tüketimini azaltmayı ve bitkisel besinlerin diyetteki payını artırmayı hedefleyen geçiş niteliğinde bir beslenme örüntüsü olarak değerlendirilebilir (Derbyshire, 2017). Bu diyet modelinde sebzeler, meyveler, tam tahıllar, kurubaklagiller, yağlı tohumlar, tohumlar ve diğer bitkisel protein kaynakları temel besin gruplarını oluşturmaktadır. Kırmızı ve işlenmiş et tüketimi azaltılırken, hayvansal kaynaklı besinler daha seyrek ve ölçülü porsiyonlarda diyete dahil edilmektedir. Dolayısıyla fleksitaryen beslenme, tamamen yasaklayıcı bir diyetten ziyade, hayvansal ürün tüketimini nicelik ve sıklık açısından sınırlandıran daha uygulanabilir bir modeldir. Bu yaklaşımın temel amacı yalnızca bireysel sağlık göstergelerini iyileştirmek değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği destekleyen daha dengeli bir beslenme davranışı geliştirmektir (Willett ve ark., 2019).

Fleksitaryen diyetin metabolik etkileri büyük ölçüde bitkisel besin tüketiminin artırılması ve kırmızı/işlenmiş et tüketiminin azaltılmasıyla ilişkilendirilmiştir. Sebze, meyve, kurubaklagil ve tam tahıl tüketiminin artması posa, antioksidan bileşikler, fitokimyasallar, magnezyum ve potasyum gibi besin ögelerinin alımını destekleyebilmektedir. Buna karşılık kırmızı ve işlenmiş et tüketiminin azaltılması, doymuş yağ ve bazı proinflatuvar bileşenlerin alımını düşürebilmektedir. Bu nedenle iyi planlanmış bir fleksitaryen beslenme örüntüsü; vücut ağırlığı kontrolü, kan lipitleri, glisemik yanıt ve kan basıncı üzerinde olumlu etkilerle ilişkilendirilebilir (Derbyshire, 2017; Hemler & Hu, 2019). Bu model, özellikle vegan ya da vejetaryen beslenmeye geçişte zorlanan bireyler için daha gerçekçi ve sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır. Hayvansal kaynaklı besinlerin diyetten tamamen ıkarılmaması, B12 vitamini, demir, çinko ve uzun zincirli omega-3

yağ asitleri gibi besin öğelerinin yetersizliği açısından vegan diyetle kıyasla daha düşük risk oluşturabilmektedir. Hayvansal besinlerin azaltıldığı durumlarda protein kalitesi, demir ve çinko biyoyararlılığı, B12 vitamini alımı ve omega-3 yağ asitleri gereksinimi dikkatle değerlendirilmelidir. Fleksiteryen diyetin sağlık üzerindeki potansiyel yararları, diyetin gerçek besin içeriğine doğrudan bağlıdır. Eğer bu model; rafine tahıllar, şekerli ürünler, kızartılmış yiyecekler ve ultra işlenmiş bitkisel alternatiflerle uygulanırsa beklenen metabolik avantajlar belirgin biçimde azalabileceği bildirilmiştir. Bu nedenle, fleksiteryen beslenmede esas hedef, yalnızca et tüketimini azaltmak değil; besin değeri yüksek, az işlenmiş ve çeşitli bitkisel besinleri merkeze alan bir örüntü oluşturmaktır. Kurubaklagiller, tam tahıllar, sebzeler, meyveler ve yağlı tohumlar bu modelin temel yapı taşları olarak düşünülmelidir. Fleksiteryen diyetin en önemli güçlü yönlerinden biri, katı kısıtlamalara dayanmaması nedeniyle uzun dönemde uygulanabilirliğinin yüksek olmasıdır. Sosyal yaşam, kültürel beslenme alışkanlıkları ve bireysel tercihlerle daha kolay uyum sağlayabilmesi, bu modeli toplum düzeyinde sürdürülebilir beslenmeye geçiş için pratik bir seçenek haline getirmektedir. Ayrıca kırmızı et tüketiminin azaltılması, kurubaklagil ve tam tahıl tüketiminin artırılması ve bitkisel besin çeşitliliğinin artırılması, hem bireysel sağlık hem de toplum sağlığı açısından önemli kazanımlar sağlayabilmektedir. Buna ilaveten, fleksiteryen diyetin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Modelin sınırlarının net olmaması, bireylerin “azaltılmış et tüketimi” kavramını farklı şekillerde yorumlamasına neden olabilmektedir. Bu durum, diyetin standardizasyonunu ve bilimsel olarak değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Ayrıca hayvansal kaynaklı besinlerin azaltılması sürecinde besin ögesi yeterliliğinin gözetilmemesi, özellikle demir, çinko, B12 vitamini ve omega-3 yağ asitleri açısından yetersizlik riskini artırabilir. Bu nedenle fleksiteryen diyetin sağlıklı bir beslenme modeli olarak uygulanabilmesi için bireyin

gereksinimlerine, yaşam tarzına ve beslenme alışkanlıklarına uygun biçimde planlanması önemlidir.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından fleksitaryen diyet, Batı tipi et ağırlıklı beslenme örüntülerine kıyasla daha avantajlı bir model olarak değerlendirilmektedir. Kırmızı ve işlenmiş et tüketiminin azaltılması; sera gazı emisyonları, arazi kullanımı ve su tüketimi üzerinde belirgin azalma sağlayabilmektedir. Özellikle kırmızı et yerine kurubaklagiller, tam tahıllar, yerel ve mevsimsel sebze-meyveler ile minimum işlenmiş bitkisel protein kaynaklarının tercih edilmesi, çevresel etkinin azaltılmasına katkıda bulunabileceği bildirilmiştir (Poore & Nemecek, 2018; Springmann ve ark., 2018). Fleksitaryen diyetin çevresel etkisi vegan beslenmeye kıyasla daha yüksek olabilir; çünkü bu modelde hayvansal kaynaklı besinler tamamen diyetten çıkarılmamalıdır. Ancak tamamen bitkisel beslenmeye geçişin zor olduğu toplumlarda, fleksitaryen yaklaşım daha yüksek kabul edilebilirlik ve uygulanabilirlik sunabilmektedir. Bu nedenle fleksitaryen diyet, bireysel düzeyde küçük ama sürdürülebilir değişikliklerin toplum genelinde önemli çevresel kazanımlara dönüşebileceği bir beslenme modeli olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak fleksitaryen beslenme; iyi planlandığında sağlık çıktılarının iyileştirilmesini, besin çeşitliliğinin artırılmasını ve çevresel yükün azaltılmasını aynı anda destekleyebilen esnek, uygulanabilir ve sürdürülebilir bir beslenme yaklaşımıdır.

Pesketaryen Diyet

Pesketaryen diyet, kırmızı et ve kümes hayvanlarının tüketimini diyetten çıkaran; buna karşın balık ve diğer deniz ürünlerinin beslenmede yer alabildiği bitkisel ağırlıklı bir beslenme modelidir. Bu yönüyle pesketaryen beslenme, vejetaryen diyet ile Akdeniz tipi beslenme arasında konumlanan esnek ve besin ögesi

çeşitliliği yüksek bir örüntü olarak değerlendirilebilir. Diyetin temelini sebzeler, meyveler, tam tahıllar, kurubaklagiller, yağlı tohumlar ve tohumlar oluştururken; balık ve deniz ürünleri kaliteli protein, uzun zincirli omega-3 yağ asitleri ve bazı mikro besin ögeleri açısından önemli bir kaynak olarak diyetle dahil edilmektedir. Süt ürünleri ve yumurta tüketimi ise bireysel tercihlere göre değişebilmekte; bazı pesketaryen bireyler bu besinleri düzenli tüketirken, bazıları daha sınırlı miktarda tercih edebilmektedir. Pesketaryen diyetin dikkat çekici yönlerinden biri, kırmızı ve işlenmiş et tüketimini sınırlandırırken balık tüketimini korumasıdır. Bu özellik, diyeti kardiyometabolik sağlık açısından önemli hâle getirmektedir. Özellikle somon, sardalya, uskumru ve hamsi gibi yağlı balıklar; eikosapentaenoik asit ve dokosaheksaenoik asit gibi uzun zincirli omega-3 yağ asitlerinin alımına katkı sağlar. Bu yağ asitleri, kan lipitleri, inflamatuvar süreçler, damar fonksiyonu ve kardiyovasküler sağlıkla ilişkili metabolik mekanizmalar üzerinde etkili olduğu bildirilmiştir (Rimm ve ark., 2018). Pesketaryen beslenme, bitkisel besinlerin yüksek oranda tüketilmesi ve kırmızı/işlenmiş etlerin diyetten çıkarılması nedeniyle doymuş yağ alımının azaltılmasına, posa ve fitokimyasal alımının ise artırılmasına katkı sağlayabilmektedir. Sebze, meyve, tam tahıl, kurubaklagil ve zeytinyağı gibi Akdeniz tipi besin bileşenleriyle birlikte uygulandığında bu model; lipid profili, kan basıncı, glisemik kontrol ve inflamasyon belirteçleri üzerinde olumlu etkilerle ilişkilendirilebilir. Prospektif kohort çalışmalarında pesko-vejetaryen beslenme örüntülerinin bazı sağlık çıktıları açısından avantajlı olabileceği bildirilmiştir; ancak bu ilişkinin diyetin genel kalitesi, balık türü, tüketim sıklığı ve pişirme yöntemi gibi faktörlerden etkilendiği unutulmamalıdır (Orlich ve ark., 2013, 2015). Bu diyet modelinin güçlü yönlerinden biri, bitkisel ağırlıklı bir beslenme örüntüsünü deniz ürünlerinden sağlanan yüksek biyolojik değerli protein ve uzun zincirli omega-3 yağ asitleriyle birleştirmesidir. Vegan ve vejetaryen diyetlerde özellikle dikkat

edilmesi gereken B12 vitamini, iyot, selenyum ve omega-3 yağ asitleri gibi besin ögeleri, pesketaryen modelde daha kolay karşılanabilmektedir. Balık ve deniz ürünleri ayrıca D vitamini, çinko ve bazı eser elementler açısından da beslenmeye katkı sağlayabilir. Bu nedenle iyi planlanmış bir pesketaryen diyet, besin ögesi yeterliliği bakımından tamamen bitkisel beslenme modellerine kıyasla bazı avantajlar sunabilmektedir. Bununla birlikte pesketaryen diyetin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Öncelikle balık ve deniz ürünlerinde cıva, kadmiyum, dioksinler, poliklorlu bifeniller ve mikropplastikler gibi kontaminantlara maruziyet riski göz önünde bulundurulmalıdır. Bu risk özellikle büyük predatör balıklarda daha belirgin olabilir. Gebeler, emziren kadınlar, gebe kalma olasılığı bulunan bireyler ve çocuklarda yüksek cıva içerebilen büyük balıkların tüketimi sınırlandırılmalı; düşük cıva içeriğine sahip türler önceliklendirilmelidir (U.S. Food and Drug Administration & U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Ayrıca balığın kızartılarak tüketilmesi, yüksek tuz içeren işlenmiş deniz ürünlerinin sık tercih edilmesi veya diyetin rafine karbonhidratlar ve ultra işlenmiş ürünlerle desteklenmesi, pesketaryen beslenmenin beklenen sağlık yararlarını azaltabilir.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından pesketaryen diyet, kırmızı etin dışlanması nedeniyle et ağırlıklı omnivor beslenme örüntülerine göre daha düşük çevresel yük oluşturma potansiyeline sahiptir. Kırmızı et üretiminin sera gazı emisyonları, arazi kullanımı ve kaynak tüketimi üzerindeki yüksek etkisi dikkate alındığında, bu besinlerin azaltılması çevresel açıdan önemli bir kazanım sağlayabileceği belirlenmiştir (Poore& Nemecek, 2018). Ancak pesketaryen diyetin sürdürülebilirliği yalnızca kırmızı etin çıkarılmasıyla belirlenmez; tüketilen deniz ürünlerinin türü, avlanma yöntemi, yetiştiricilik koşulları ve ekosistem üzerindeki baskısı da çevresel etkiyi doğrudan şekillendirir. Deniz ürünlerinin çevresel etkisi oldukça değişkendir. Küçük yağlı balıklar, düşük trofik

seviyedeki türler, sürdürülebilir şekilde avlanan balıklar ve bazı çift kabuklu deniz ürünleri çevresel açıdan daha avantajlı olabilir. Buna karşılık büyük predatör balıklar, aşırı avlanan türler, dip trolü gibi habitat tahribatı oluşturabilen avcılık yöntemleri ve yoğun yem girdisi gerektiren bazı akuakültür sistemleri çevresel yükü artırabilir. Mavi gıdaların çevresel performansını değerlendiren çalışmalar, deniz ürünleri arasında sera gazı emisyonu, su kullanımı, arazi kullanımı ve ekosistem etkileri bakımından önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir (Gephart ve ark., 2021). Sonuç olarak pesketaryen diyet, bitkisel besin çeşitliliğini balık ve deniz ürünlerinin sağladığı kaliteli protein, omega-3 yağ asitleri ve mikro besin öğeleriyle birleştiren dengeli bir beslenme modeli olarak değerlendirilebilir. Bu model, iyi planlandığında kardiyometabolik sağlık, besin ögesi yeterliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlayabilir. Ancak bu yararların sürdürülebilir olabilmesi için balık türü seçiminde cıva ve diğer kontaminant riski dikkate alınmalı, sürdürülebilir avcılık veya yetiştiricilik kaynakları tercih edilmeli, kızartma ve aşırı işlenmiş deniz ürünleri sınırlandırılmalıdır. En uygun pesketaryen model; sebze, meyve, tam tahıl, kurubaklagil, yağlı tohumlar ve zeytinyağı gibi besinleri temel alan, balık ve deniz ürünlerini ise bilinçli, ölçülü ve sürdürülebilir kaynaklardan sağlayan bir beslenme örüntüsüdür.

DASH Diyeti

DASH diyeti, “Dietary Approaches to Stop Hypertension” ifadesinin kısaltması olup, hipertansiyonun önlenmesi ve beslenme yoluyla yönetilmesi amacıyla geliştirilmiş kanıta dayalı bir beslenme modelidir. Bu yaklaşım, belirli bir makro besin ögesinin katı biçimde sınırlandırılmasından ziyade, besin kalitesinin artırılmasına ve kardiyovasküler sağlığı destekleyen besin gruplarının düzenli tüketimine odaklanmaktadır. DASH beslenme örüntüsünde sebzeler, meyveler, tam tahıllar, düşük yağlı süt ürünleri, kurubaklagiller,

yağlı tohumlar, balık ve derisiz beyaz etler ön plana çıkarken; kırmızı et, işlenmiş et ürünleri, şekerli içecekler, tatlılar, doymuş yağ kaynakları ve sodyum içeriği yüksek besinler sınırlandırılmaktadır (Appel ve ark., 1997; National Heart, Lung, and Blood Institute, 2026). DASH diyetinin temel beslenme ilkesi; potasyum, magnezyum, kalsiyum ve posa bakımından zengin, buna karşılık sodyum ve doymuş yağ içeriği düşük bir diyet örüntüsü oluşturmaktır. Bu özellikleri nedeniyle DASH diyeti yalnızca hipertansiyon yönetimiyle sınırlı bir yaklaşım olarak değil, kardiyovasküler hastalık riski, metabolik sendrom, obezite ve genel halk sağlığı açısından da önemli bir beslenme modeli olarak değerlendirilmektedir. Sebze, meyve, tam tahıl ve kurubaklagil tüketiminin artırılması, diyetin posa ve mikro besin ögesi yoğunluğunu yükseltirken; düşük yağlı süt ürünleri kalsiyum alımına katkı sağlamaktadır. DASH diyetinin en belirgin ve en iyi kanıtlanmış metabolik etkisi kan basıncı üzerindeki düzenleyici rolüdür. Yüksek potasyum, magnezyum ve kalsiyum alımı; düşük sodyum ve doymuş yağ tüketimiyle birlikte vasküler fonksiyon, sıvı-elektrolit dengesi ve kan basıncı regülasyonu üzerinde olumlu etki gösterebilir. Randomize kontrollü çalışmalarda DASH diyetinin hem hipertansiyonu olan hem de kan basıncı yüksek-normal aralıkta bulunan bireylerde sistolik ve diyastolik kan basıncını azaltabildiği gösterilmiştir (Appel ve ark., 1997; Sacks ve ark., 2001). Ayrıca DASH diyetinin kan basıncı üzerindeki etkisinin, sodyum alımının azaltılmasıyla birlikte daha belirgin hâle geldiği bildirilmektedir (Sacks ve ark., 2001). DASH diyeti yalnızca kan basıncı kontrolü açısından değil, diğer kardiyometabolik göstergeler bakımından da yararlı etkiler sağlayabilir. Sebze, meyve, tam tahıl ve kurubaklagillerin diyetinde daha fazla yer alması posa alımını artırarak glisemik yanıtın düzenlenmesine, tokluk hissinin desteklenmesine ve vücut ağırlığı yönetimine katkıda bulunabilir.

Doymuş yağ ve işlenmiş et tüketiminin sınırlandırılması ise serum lipid profili üzerinde olumlu etkiler oluşturabilir. Bu nedenle DASH beslenme modeli, hipertansiyonun yanı sıra dislipidemi, insülin direnci ve metabolik sendrom riskinin azaltılmasına yönelik bütüncül bir beslenme yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Filippou ve ark., 2020; Schwingshackl ve ark., 2019). Bu diyet modelinin en güçlü yönlerinden biri, bilimsel kanıt düzeyinin yüksek olmasıdır. DASH diyeti, yalnızca popüler bir beslenme eğilimi değil; randomize kontrollü çalışmalarla etkinliği desteklenen ve hipertansiyon yönetimine ilişkin kılavuzlarda yer alan bir beslenme yaklaşımıdır. Ayrıca besin gruplarını tamamen çıkarılmaması, bireysel gereksinimlere göre uyarlanabilir olması ve farklı kültürel beslenme alışkanlıklarına adapte edilebilmesi uzun dönem uygulanabilirliğini artırmaktadır. Bu yönüyle DASH diyeti, hem klinik beslenme uygulamalarında hem de toplum temelli halk sağlığı stratejilerinde kullanılabilecek pratik bir modeldir. Bununla birlikte DASH diyetinin uygulanmasında bazı sınırlılıklar bulunmaktadır. Öncelikle sodyum alımının azaltılması, özellikle tuz tüketiminin yüksek olduğu toplumlarda belirgin davranış değişikliği gerektirebilir. Hazır gıdalar, paketli ürünler, salamura besinler, işlenmiş etler ve restoran yemekleri sodyum alımının önemli kaynakları arasında yer aldığından, bireylerin etiket okuma becerilerinin geliştirilmesi önemlidir. Ayrıca sebze, meyve, tam tahıl ve düşük yağlı süt ürünlerinin düzenli tüketimi, bazı bireylerde ekonomik erişilebilirlik ve besin hazırlama alışkanlıkları açısından güçlük oluşturabilir. Düşük sosyoekonomik düzeydeki gruplarda taze ve kaliteli besinlere erişimin sınırlı olması, DASH diyetinin sürdürülebilir biçimde uygulanmasını zorlaştırabilir. DASH diyeti her birey için aynı biçimde uygulanmamalı, özellikle kronik böbrek hastalığı olan bireylerde dikkatli planlanmalıdır. Bu diyetin potasyum ve fosfor içeriği görece yüksek olabileceğinden, böbrek fonksiyonları bozulmuş bireylerde serum elektrolitleri ve bireysel klinik durum dikkate alınarak düzenleme yapılmalıdır. Benzer

şekilde diyabet, kalp yetersizliği veya ilaç tedavisi alan bireylerde de diyetin enerji, karbonhidrat, sodyum, potasyum ve sıvı içeriği bireyselleştirilmelidir. Bu nedenle DASH diyeti, genel ilkeleri güçlü olmakla birlikte, klinik durumlara göre kişiye özgü biçimde planlanması gereken bir beslenme modelidir.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde DASH diyeti, Batı tipi et ağırlıklı ve ultra işlenmiş ürünlerden zengin beslenme örüntülerine kıyasla daha düşük çevresel etki oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu durum, diyetin sebze, meyve, tam tahıl, kurubaklagil ve yağlı tohum tüketimini artırması; kırmızı ve işlenmiş et tüketimini ise sınırlandırmasıyla ilişkilidir. Bitkisel kaynaklı besinlerin daha fazla kullanılması, sera gazı emisyonları, arazi kullanımı ve doğal kaynak tüketimi açısından avantaj sağlayabilir (Monsivais ve ark., 2015; Poore & Nemecek, 2018). Buna karşın DASH diyeti tamamen bitkisel bir model değildir ve düşük yağlı süt ürünleri ile bazı hayvansal protein kaynaklarını içermektedir. Bu nedenle çevresel etkisi, vegan veya tamamen bitkisel temelli diyetlere kıyasla daha yüksek olabilir. Özellikle süt ürünlerinin tüketim miktarı, üretim yöntemi, taşıma mesafesi ve yerel erişilebilirliği çevresel çıktıları etkileyen önemli değişkenlerdir. Bu nedenle çevresel açıdan optimize edilmiş bir DASH modeli; kurubaklagiller, tam tahıllar, sebze-meyveler ve yağlı tohumları daha fazla öne çıkarırken, hayvansal ürünleri ölçülü ve sürdürülebilir kaynaklardan seçmeyi gerektirir. Sonuç olarak DASH diyeti, hipertansiyonun önlenmesi ve yönetiminde güçlü bilimsel kanıtlara sahip, besin kalitesini merkeze alan ve uzun dönemde uygulanabilirliği yüksek bir beslenme modelidir. Kan basıncı kontrolünün yanı sıra lipid profili, glisemik yanıt, vücut ağırlığı yönetimi ve genel kardiyometabolik sağlık üzerinde olumlu etkiler sağlayabilir. Bununla birlikte diyetin başarısı; sodyum alımının azaltılması, posa ve mikro besin ögesi yoğunluğunun artırılması, işlenmiş ürünlerin sınırlandırılması ve bireysel klinik

gereksinimlerin dikkate alınmasına bağlıdır. Çevresel açıdan ise DASH diyeti, et ağırlıklı Batı tipi beslenmeye göre daha sürdürülebilir bir seçenek olmakla birlikte, hayvansal ürünlerin miktarı ve kaynağı dikkate alınarak daha çevreci bir yapıya kavuşturulabilir.

MIND Diyeti

MIND diyeti, “Mediterranean-DASH Intervention for Neurodegenerative Delay” ifadesinin kısaltması olup, Akdeniz diyeti ile DASH diyetinin nörobilişsel sağlığı desteklemeye yönelik bileşenlerinin bir araya getirilmesiyle geliştirilmiş bir beslenme modelidir. Bu yaklaşımın temel amacı, yaşlanma süreciyle ilişkili bilişsel gerilemeyi yavaşlatmaya ve Alzheimer hastalığı riskini azaltmaya katkı sağlayabilecek bir beslenme örüntüsü oluşturmaktır. MIND diyeti, klasik kilo kaybı diyetlerinden farklı olarak öncelikle beyin sağlığını, vasküler fonksiyonları ve nörodejeneratif süreçlerle ilişkili beslenme faktörlerini hedefleyen koruyucu bir model olarak değerlendirilmektedir (Morris ve ark., 2015). Bu diyet modelinde yeşil yapraklı sebzeler, diğer sebzeler, orman meyveleri, tam tahıllar, kurubaklagiller, yağlı tohumlar, zeytinyağı, balık ve kümes hayvanları desteklenen temel besin grupları arasında yer almaktadır. Buna karşılık kırmızı et, tereyağı, margarin, peynir, hamur işleri, tatlılar, kızartılmış yiyecekler ve fast-food ürünleri sınırlandırılmaktadır. Bu yönüyle MIND diyeti, Akdeniz ve DASH diyetlerinin kardiyometabolik sağlığı destekleyen özelliklerini korurken, bazı besin gruplarını özellikle beyin sağlığı açısından önceliklendirmesiyle bu modellerden ayrılmaktadır. MIND diyetinin öne çıkan hedefi nörobilişsel sağlığın korunmasıdır. Yeşil yapraklı sebzeler, orman meyveleri, zeytinyağı, yağlı tohumlar ve balık gibi besinler; antioksidan, antiinflamatuvar ve vasküler koruyucu bileşenler açısından zengindir. Bu besinlerin içerdiği polifenoller, karotenoidler, E vitamini, folat, tekli doymamış yağ

asitleri ve uzun zincirli omega-3 yağ asitleri; oksidatif stres, nöroinflamasyon, damar sağlığı ve sinaptik fonksiyonlar üzerinde destekleyici rol oynayabilir. Bu nedenle MIND diyeti, yalnızca belirli bir besin grubunun artırılmasına değil, beyin yaşlanmasıyla ilişkili çoklu mekanizmaların beslenme yoluyla desteklenmesine dayanmaktadır. Gözlemsel çalışmalarda MIND diyetine daha yüksek uyumun daha yavaş bilişsel gerileme ve daha düşük Alzheimer hastalığı riski ile ilişkili olabileceği bildirilmiştir. Özellikle yeşil yapraklı sebzeler ve orman meyveleri bu modelde özel bir öneme sahiptir. Yeşil yapraklı sebzeler folat, K vitamini, lutein ve beta-karoten gibi nörobilişsel sağlıkla ilişkilendirilen bileşenler sağlarken; orman meyveleri antosiyaninler ve diğer polifenolik bileşikler bakımından zengindir. Bu özellikler, MIND diyetinin beyin sağlığına yönelik özgün yaklaşımını güçlendirmektedir (Morris ve ark., 2015). MIND diyeti aynı zamanda kardiyometabolik sağlık açısından da destekleyici bir potansiyele sahiptir. DASH ve Akdeniz diyetlerinin ortak özelliklerini taşıdığı için kan basıncı, serum lipid profili, glisemik kontrol ve inflamasyon üzerinde olumlu etkiler oluşturabilecek bir beslenme örüntüsü sunmaktadır. Sebze, tam tahıl, kurubaklagil ve yağlı tohum tüketiminin artması posa, bitkisel protein, magnezyum ve antioksidan alımını desteklerken; kırmızı et, tereyağı, kızartmalar ve rafine ürünlerin sınırlandırılması doymuş yağ ve ultra işlenmiş besin alımını azaltabilir. Bu nedenle MIND diyeti, nörobilişsel sağlığı hedeflemekle birlikte kardiyometabolik risk faktörlerinin yönetimine de katkı sağlayabilecek bütüncül bir model olarak değerlendirilebilir. Bu beslenme modelinin en güçlü yönlerinden biri, beyin sağlığı açısından ön plana çıkan belirli besin gruplarını sistematik biçimde tanımlamasıdır. Akdeniz ve DASH diyetlerinin kanıta dayalı bileşenlerini birleştirmesi, MIND diyetinin bilimsel temelini güçlendirmektedir. Ayrıca besin gruplarını tamamen dışlayan katı bir model olmaması, uzun dönem uygulanabilirliğini artırabilir. Bireylerin yeşil yapraklı sebze, tam tahıl, kurubaklagil,

zeytinyağı ve yağlı tohum tüketimini artırması; kırmızı et, tereyağı, tatlılar ve kızartılmış yiyecekleri azaltması, pratik beslenme davranışları açısından uygulanabilir hedefler sunmaktadır. Bununla birlikte MIND diyetiyle ilgili kanıtların dikkatle yorumlanması gerekmektedir. Bu alandaki çalışmaların önemli bir kısmı gözlemsel niteliktedir ve gözlemsel araştırmalar nedensellik ilişkisini doğrudan kanıtlamaz. Ayrıca MIND diyeti üzerine yürütülen randomize kontrollü çalışmalar henüz sınırlıdır. Barnes ve arkadaşları (2023) tarafından yürütülen randomize kontrollü çalışmada, MIND diyeti ile hafif enerji kısıtlaması uygulanan kontrol diyeti arasında bilişsel sonuçlar bakımından anlamlı bir fark saptanmamıştır. Bu durum, MIND diyetinin potansiyel etkilerinin bireyin başlangıçtaki diyet kalitesi, yaşı, genetik yatkınlığı, metabolik durumu, eğitim düzeyi ve yaşam tarzı faktörleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. MIND diyetinin bir diğer sınırlılığı, bazı temel bileşenlerin maliyet ve erişilebilirlik açısından her toplumda aynı düzeyde uygulanabilir olmamasıdır. Orman meyveleri, zeytinyağı, balık ve yağlı tohumlar bazı bölgelerde pahalı veya sınırlı erişilebilir olabilir. Bu nedenle MIND diyetinin farklı toplumlara uyarlanması yerel ve mevsimsel besin seçeneklerinin kullanılması önem taşımaktadır. Örneğin orman meyvelerine erişimin kısıtlı olduğu durumlarda polifenol içeriği yüksek yerel meyveler; ithal yağlı tohumlar yerine bölgesel kuruyemişler; pahalı balık türleri yerine daha erişilebilir ve sürdürülebilir küçük yağlı balıklar tercih edilebilir.

Çevresel sürdürülebilirlik açısından MIND diyeti, bitkisel besinleri merkeze alması ve kırmızı et, tereyağı, kızartılmış yiyecekler ile ultra işlenmiş ürünleri sınırlandırması nedeniyle Batı tipi beslenme örüntülerine kıyasla daha avantajlı bir model olarak değerlendirilebilir. Sebze, tam tahıl, kurubaklagil, yağlı tohum ve zeytinyağı gibi besinlerin diyetle daha fazla yer alması, hem besin kalitesini artırmakta hem de daha sürdürülebilir bir beslenme

yapısına katkı sağlamaktadır. Kırmızı et tüketiminin azaltılması ise sera gazı emisyonları, arazi kullanımı ve doğal kaynak tüketimi açısından önemli çevresel kazanımlar sağlayabileceği vurgulanmıştır (Poore & Nemecek, 2018; Springmann ve ark., 2018). Buna karşın, MIND diyetinin çevresel etkisi, kullanılan besinlerin üretim ve tedarik koşullarına göre değişebilir. Balık, zeytinyağı, orman meyveleri ve ithal yağlı tohumlar; üretim yöntemi, taşıma mesafesi, paketlenme ve kaynak yönetimi gibi faktörlere bağlı olarak farklı çevresel yükler oluşturabilir. Bu nedenle çevresel açıdan optimize edilmiş bir MIND diyeti, yerel yeşil yapraklı sebzeler, mevsimsel meyveler, kurubaklagiller, tam tahıllar, sürdürülebilir balık kaynakları ve minimum işlenmiş bitkisel besinler üzerine kurulmalıdır. Böyle bir yaklaşım, hem nörobilişsel sağlığı destekleyen beslenme bileşenlerini koruyabilir hem de diyetin çevresel etkisini azaltabilir. Sonuç olarak MIND diyeti, Akdeniz ve DASH diyetlerinin beyin sağlığına yönelik seçilmiş bileşenlerini birleştiren, nörobilişsel sağlığı ve kardiyometabolik iyilik hâlini birlikte hedefleyen kanıta dayalı bir beslenme modelidir. Özellikle yeşil yapraklı sebzeler, orman meyveleri, tam tahıllar, kurubaklagiller, zeytinyağı, yağlı tohumlar ve balığın ön plana çıkarılması; kırmızı et, tereyağı, tatlılar, kızartmalar ve ultra işlenmiş ürünlerin sınırlandırılması bu modelin temelini oluşturmaktadır. En uygun uygulama biçimi; bireyin sağlık durumu, beslenme alışkanlıkları, ekonomik koşulları ve yerel besin erişimi dikkate alınarak planlanan, bitkisel ağırlıklı ve sürdürülebilir bir MIND beslenme örüntüsüdür.

Yaşam Döngüsü Analizleri, İklim Değişikliği Etkisi ve Tatlı Su Ekotoksitesitesi Açısından Diyet Modellerinin Karşılaştırılması

Beslenme modellerinin çevresel etkilerini değerlendirmede Yaşam Döngüsü Analizi, gıdanın üretiminden atık yönetimine kadar tüm aşamalarda oluşan çevresel yükleri bütüncül biçimde inceleyen

temel yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem; tarımsal üretim, yem üretimi, gübre ve pestisit kullanımı, sulama, işleme, ambalajlama, taşıma, depolama, pişirme ve atık yönetimi gibi çok sayıda süreci dikkate alır. Bu nedenle bir diyetin çevresel etkisi yalnızca hayvansal veya bitkisel besin içeriğiyle değil; üretim sistemi, kaynak kullanımı, tedarik zinciri, işleme düzeyi ve gıda israfı gibi faktörlerle birlikte değerlendirilmelidir (International Organization for Standardization, 2006). Diyetlerin çevresel karşılaştırmalarında en sık kullanılan göstergeler sera gazı emisyonları, karbon ayak izi, arazi ve su kullanımı, ötrofikasyon, asidifikasyon, biyoçeşitlilik kaybı ve tatlı su ekotoksitesidir. İklim değişikliğine etki genellikle kilogram karbondioksit eşdeğeri ile ifade edilirken, tatlı su ekotoksitesisi pestisitler, herbisitler, ağır metaller, gübre kalıntıları, veteriner ilaçları, endüstriyel kimyasallar ve atık yönetimi gibi kirletici kaynakların sucul ekosistemler üzerindeki potansiyel toksik etkilerini yansıtır (Rosenbaum ve ark., 2008).

İklim değişikliğine etki açısından diyetler arasındaki temel fark, büyük ölçüde hayvansal kaynaklı besinlerin miktarı ve türünden kaynaklanmaktadır. Özellikle sığır ve kuzu eti gibi geniş getiren hayvanlardan elde edilen kırmızı etler; enterik fermentasyon sonucu oluşan metan, yem üretimi, arazi kullanımı, gübre yönetimi ve enerji girdileri nedeniyle karbon ayak izi en yüksek besin grupları arasındadır. Peynir gibi yoğun süt girdisi gerektiren ürünler de bitkisel besinlere kıyasla daha yüksek çevresel yük oluşturabilir. Buna karşılık kurubaklagiller, tam tahıllar, sebzeler, meyveler, yağlı tohumlar ve bitkisel protein kaynakları genellikle daha düşük sera gazı emisyonlarıyla ilişkilendirilmektedir (Clark ve ark., 2019; Poore & Nemecek, 2018). Bu bağlamda vegan, vejetaryen, fleksitaryen, klimataryan ve Gezegenel Sağlık Diyeti gibi bitkisel ağırlıklı modeller, iklim değişikliğine etki bakımından daha avantajlıdır. Vegan diyet, hayvansal kaynaklı tüm besinleri dışlaması nedeniyle karbon ayak izi en düşük modellerden biri

olarak öne çıkarken; vejetaryen diyet de kırmızı et, kümes hayvanları ve balığı dışladığı için omnivor ve et ağırlıklı örüntülere kıyasla daha düşük iklim etkisine sahiptir. Ancak vejetaryen modelde süt ürünleri ve yumurta tüketimi arttıkça çevresel etki yükselmektedir (Scarborough ve ark., 2014, 2023). Fleksitaryen ve klimataryan yaklaşımlar ise kırmızı ve işlenmiş etleri azaltıp kurubaklagiller, tam tahıllar, yerel-mevsimsel besinler ve gıda israfını azaltma ilkelerini öncelediğinden toplum düzeyinde uygulanabilir sürdürülebilir seçenekler sunar. Gezegensel Sağlık Diyeti de kırmızı eti sınırlı tutup bitkisel kaynakları merkeze alması nedeniyle insan sağlığı ile gezegen sınırlarını birlikte ele alan bütüncül bir modeldir (Willett ve ark., 2019).

Akdeniz, DASH ve MIND diyetleri; sebze, meyve, tam tahıl, kurubaklagil, yağlı tohum ve zeytinyağı gibi bitkisel kaynakları öne çıkarmaları nedeniyle orta-düşük çevresel yüke sahip, sağlık kanıtı güçlü ve uygulanabilir modellerdir. Bununla birlikte balık, süt ürünleri, yumurta ve bazı hayvansal proteinleri içerdikleri için tamamen bitkisel modellere göre çevresel etkileri daha yüksek olabilir. Yine de kırmızı ve işlenmiş etleri sınırlandırmaları nedeniyle Batı tipi beslenme, ketojenik diyet, Atkins diyeti, Paleo diyeti ve hayvansal protein ağırlıklı yüksek proteinli diyetlerden daha sürdürülebilir kabul edilmektedir (Hallström ve ark., 2015; Springmann ve ark., 2018). Pesketaryen diyet kırmızı et ve kümes hayvanlarını dışlayarak iklim etkisini azaltabilir; ancak sürdürülebilirliği tüketilen deniz ürünlerinin türüne, avlanma yöntemine, yetiştiricilik koşullarına, yem girdilerine ve taşımacılık süreçlerine bağlıdır (Gephart ve ark., 2021). Ketojenik, Atkins ve Paleo diyetleri ise tahıllar, kurubaklagiller ve bazı karbonhidrat kaynaklarını sınırlandırmaları; buna karşılık et, yumurta, peynir, tereyağı ve diğer hayvansal ürünlere daha fazla yer verebilmeleri nedeniyle iklim değişikliğine etki açısından daha dezavantajlıdır. Özellikle kırmızı et ve yüksek yağlı süt ürünleriyle uygulanan düşük

karbonhidratlı modeller karbon ayak izini artırabilir. Popüler diyetlerin çevresel etkilerini karşılaştıran çalışmalarda keto ve paleo diyetlerinin vegan ve vejetaryen modellere göre daha yüksek karbon ayak izine sahip olduğu bildirilmiştir (O'Malley ve ark., 2023). Yüksek proteinli diyetlerin çevresel etkisi ise proteinin kaynağına bağlıdır; kırmızı ve işlenmiş et ağırlıklı modeller çevresel yükü artırırken, kurubaklagiller, soya ürünleri, mercimek, nohut, fasulye, yağlı tohumlar ve tam tahıllara dayalı modeller daha düşük etki oluşturur. Tatlı su ekotoksitesitesi açısından değerlendirme, karbon ayak izine göre daha değişkendir. Hayvansal üretim, yalnızca doğrudan yetiştiricilikle değil; yem bitkilerinin üretimi, pestisit ve gübre kullanımı, hayvan gübresi, antibiyotik kalıntıları, çiftlik atıkları ve işleme süreçleri yoluyla da sucul ekosistemler üzerinde baskı oluşturabilir. Bununla birlikte bitkisel ağırlıklı diyetler de yoğun pestisit kullanımı, uzun tedarik zinciri, sera üretimi, sulama ve yüksek işleme düzeyi nedeniyle tatlı su ekotoksitesitesi açısından her koşulda en düşük etkiye sahip değildir. Bu nedenle vegan ve vejetaryen modellerin çevresel üstünlüğü; yerel, mevsimsel, düşük pestisit girdili, minimum işlenmiş ve düşük ambalajlı ürünlerle desteklendiğinde daha belirgin hâle gelir. Aynı besin grubunda bile üreticiye, sulama sistemine, gübre yönetimine, enerji kaynağına ve atık yönetimine bağlı olarak çevresel etkinin büyük ölçüde değişebilmesi bu değerlendirmelerde ürün ve üretim sistemi düzeyinde ayrım yapılmasını gerekli kılmaktadır (Poore ve Nemecek, 2018). Sonuç olarak, iklim değişikliğine etki bakımından en düşük çevresel yüke sahip modeller genellikle vegan ve vejetaryen diyetlerdir; bunları fleksitaryen, klimataryan ve Gezegenel Sağlık Diyeti izlemektedir. Akdeniz, DASH ve MIND diyetleri sağlık kanıtı güçlü, uygulanabilir ve orta-düşük çevresel etkiye sahip modellerdir. Pesketaryen diyetin etkisi deniz ürünlerinin sürdürülebilirliğine bağlıyken; ketojenik, Atkins, Paleo ve hayvansal protein ağırlıklı yüksek proteinli diyetler özellikle kırmızı et ve süt ürünleri fazla tüketildiğinde daha yüksek çevresel yük oluşturur.

Tatlı su ekotoksitesitesi açısından ise yalnızca hayvansal ürünlerin azaltılması yeterli değildir; pestisit, gübre, kimyasal girdi, işleme, taşımacılık ve atık yönetimi de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle en sürdürülebilir beslenme örüntüleri; bitkisel ağırlıklı, düşük kırmızı etli, kurubaklagil ve tam tahıl temelli, yerel ve mevsimsel ürünleri önceleyen, minimum işlenmiş ve gıda israfını azaltan modellerdir.

Sonuç ve Sistematik Çözüm Yolları

Popüler diyet modellerinin metabolik sağlık ve çevresel sürdürülebilirlik açısından birlikte değerlendirilmesi, tek bir beslenme yaklaşımının tüm bireyler, toplumlar ve ekolojik koşullar için evrensel olarak üstün kabul edilemeyeceğini göstermektedir. Diyetlerin bireysel sağlık üzerindeki etkileri; yaş, cinsiyet, vücut kompozisyonu, metabolik durum, kronik hastalık varlığı, ilaç kullanımı, fiziksel aktivite düzeyi, sosyoekonomik koşullar, kültürel beslenme alışkanlıkları ve gıdaya erişim olanakları gibi çok sayıda değişken tarafından belirlenmektedir. Benzer şekilde çevresel çıktılar da yalnızca tüketilen besin gruplarıyla açıklanamaz. Üretim yöntemi, tedarik zinciri, işleme derecesi, taşıma mesafesi, enerji ve su kullanımı, pestisit ve gübre girdileri, ambalajlama, atık yönetimi ve gıda kayıpları çevresel yükün oluşumunda belirleyici rol oynamaktadır (Poore & Nemecek, 2018; Springmann ve ark., 2018). Bu çalışma kapsamında ele alınan diyet modelleri bütüncül biçimde değerlendirildiğinde; bitkisel kaynaklı besinleri merkeze alan, minimum işlenmiş ürünlere dayanan, posa içeriği yüksek, kırmızı ve işlenmiş et tüketimini sınırlandıran beslenme örüntülerinin hem metabolik sağlık hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı bir çerçeve sunduğu görülmektedir. Vegan, vejetaryen, fleksitaryen, klimataryan, Gezegenel Sağlık Diyeti ve geleneksel Akdeniz diyeti; kurubaklagiller, tam tahıllar, sebzeler, meyveler, yağlı tohumlar ve zeytinyağı gibi besinleri ön plana çıkarmaları nedeniyle insan sağlığı ile gezegen sağlığı arasında daha dengeli bir

ilişki kurulmasına katkı sağlayabilmektedir (Aleksandrowicz ve ark., 2016; Willett ve ark., 2019). Akdeniz diyeti, kardiyometabolik sağlık açısından en fazla araştırılmış beslenme modellerinden biridir. Bu modelin temel özellikleri arasında sebze, meyve, tam tahıl, kurubaklagil, zeytinyağı, balık ve yağlı tohum tüketiminin yüksek; kırmızı et, işlenmiş et ve ultra işlenmiş besin tüketiminin ise sınırlı olması yer almaktadır. Meta-analizler, Akdeniz diyetine yüksek uyumun toplam mortalite, kardiyovasküler hastalıklar ve bazı kronik hastalık riskleriyle ters yönde ilişkili olduğunu göstermektedir (Sofi ve ark., 2014; Dinu ve ark., 2018). DASH diyeti ise özellikle kan basıncı kontrolü açısından güçlü kanıtlara sahip olup, sebze, meyve, düşük yağlı süt ürünleri, tam tahıllar ve düşük sodyum alımına dayalı yapısıyla hipertansiyon yönetiminde önemli bir beslenme yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Filippou ve ark., 2020; Saneei ve ark., 2014). Buna karşılık ketojenik diyet, Atkins diyeti, Paleo diyeti ve hayvansal protein ağırlıklı yüksek proteinli beslenme modelleri kısa dönemde kilo kaybı, glisemik kontrol veya iştah regülasyonu gibi bazı metabolik göstergelerde olumlu sonuçlar sağlayabilse de uzun dönemli etkileri daha dikkatli yorumlanmalıdır. Düşük karbonhidratlı diyetlere ilişkin meta-analizlerde vücut ağırlığı ve trigliserit düzeylerinde iyileşmeler bildirilebilmekle birlikte, bazı çalışmalarda LDL-kolesterol düzeylerinde artış görülebilmektedir (Mansoor ve ark., 2016). Kırmızı et ve yüksek miktarda hayvansal ürün tüketimi; sera gazı emisyonları, arazi kullanımı, yem üretimi ve doğal kaynak tüketimi açısından yüksek çevresel yük oluşturan temel bileşenler arasında yer almaktadır. Buna karşılık kurubaklagiller başta olmak üzere bitkisel protein kaynakları, genellikle daha düşük karbon ayak iziyle protein sağlayabilmektedir. Poore ve Nemecek'in (2018) geniş kapsamlı yaşam döngüsü analizinde, gıda ürünlerinin çevresel etkilerinin üretim sistemlerine göre önemli farklılıklar gösterdiği; ancak genel eğilim olarak hayvansal kaynaklı ürünlerin birçok çevresel göstergede bitkisel kaynaklı ürünlere kıyasla daha yüksek çevresel yük taşıdığı ortaya

konmuştur. Bu nedenle sürdürülebilir beslenme yalnızca daha az enerji almak ya da daha az tüketmek şeklinde dar bir çerçevede ele alınmamalı; çevresel etkisi daha düşük, besin ögesi yoğunluğu yüksek ve kültürel olarak uygulanabilir besinlerin daha sık tercih edilmesi biçiminde değerlendirilmelidir. Karbon ayak izi yoğunlukla sera gazı emisyonlarıyla ilişkilendirilirken, tatlı su ekotoksitesitesi pestisitler, gübre kalıntıları, ağır metaller, veteriner ilaçları, antibiyotik kalıntıları, işleme kimyasalları ve tarımsal yüzey akışı gibi çok sayıda kirletici kaynağı kapsamaktadır. Bu nedenle bitkisel ağırlıklı diyetlerin iklim değişikliği açısından genellikle daha avantajlı olması, her koşulda tatlı su ekosistemleri üzerinde en düşük etkiye sahip oldukları anlamına gelmemektedir. Yoğun pestisit kullanılan, uzun tedarik zincirine bağlı, mevsim dışı üretilen veya yüksek düzeyde işlenmiş bitkisel ürünler de sucul ekosistemler üzerinde baskı oluşturabilir. Öte yandan hayvansal üretimde yem üretimi, gübre yönetimi, antibiyotik kullanımı ve atık süreçleri tatlı su ekotoksitesitesi açısından önemli risk alanlarıdır (Clark ve ark., 2019; Poore & Nemecek, 2018). Bu değerlendirmeler, sağlıklı ve sürdürülebilir bir diyetin yalnızca popüler bir diyet adıyla tanımlanamayacağını göstermektedir. FAO ve WHO tarafından tanımlanan sürdürülebilir sağlıklı diyet ilkeleri de bu bütüncül yaklaşımı desteklemektedir. Bu ilkelere göre sürdürülebilir sağlıklı diyetler; bireylerin sağlık ve iyi oluşunu desteklemeli, çevresel etkisi düşük olmalı, kültürel olarak kabul edilebilir, ekonomik açıdan ulaşılabilir, güvenli ve beslenme açısından yeterli olmalıdır (Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization, 2019).

Kaynakça

- Afshin, A., Sur, P. J., Fay, K. A., Cornaby, L., Ferrara, G., Salama, J. S., Mullany, E. C., Abate, K. H., Abbafati, C., Abebe, Z., ve ark. (2019). Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 393(10184), 1958–1972. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30041-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30041-8)
- Aleksandrowicz, L., Green, R., Joy, E. J. M., Smith, P., & Haines, A. (2016). The impacts of dietary change on greenhouse gas emissions, land use, water use, and health: A systematic review. *PLOS ONE*, 11(11), Article e0165797. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165797>
- Appel, L. J., Moore, T. J., Obarzanek, E., Vollmer, W. M., Svetkey, L. P., Sacks, F. M., Bray, G. A., Vogt, T. M., Cutler, J. A., Windhauser, M. M., Lin, P. H., & Karanja, N. (1997). A clinical trial of the effects of dietary patterns on blood pressure. *The New England Journal of Medicine*, 336(16), 1117–1124. <https://doi.org/10.1056/NEJM199704173361601>
- Atkins, R. C. (2002). *Dr. Atkins' new diet revolution*. M. Evans and Company.
- Bach-Faig, A., Berry, E. M., Lairon, D., Reguant, J., Trichopoulou, A., Dernini, S., Medina, F. X., Battino, M., Belahsen, R., Miranda, G., & Serra-Majem, L. (2011). Mediterranean diet

- pyramid today: Science and cultural updates. *Public Health Nutrition*, 14(12A), 2274–2284.
<https://doi.org/10.1017/S1368980011002515>
- Bakaloudi, D. R., Halloran, A., Rippin, H. L., Oikonomidou, A. C., Dardavesis, T. I., Williams, J., Wickramasinghe, K., Breda, J., & Chourdakis, M. (2021). Intake and adequacy of the vegan diet: A systematic review of the evidence. *Clinical Nutrition*, 40(5), 3503–3521.
<https://doi.org/10.1016/j.clnu.2020.11.035>
- Barnes, L. L., Dhana, K., Liu, X., Carey, V. J., Ventrelle, J., Johnson, K., Hollings, C. S., Bishop, L., Laranjo, N., Stubbs, B. J., Reilly, X., Agarwal, P., Zhang, S., Grodstein, F., Tangney, C. C., Holland, T. M., Aggarwal, N. T., Arfanakis, K., Rajan, K. B., ... Morris, M. C. (2023). Trial of the MIND diet for prevention of cognitive decline in older persons. *The New England Journal of Medicine*, 389(7), 602–611.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa2302368>
- Beal, T., Ortenzi, F., & Fanzo, J. (2023). Estimated micronutrient shortfalls of the EAT-Lancet planetary health diet. *The Lancet Planetary Health*, 7(3), e233–e237.
[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00006-2)
- Benatar, J.R., & Stewart, R. A. H. (2018). Cardiometabolic risk factors in vegans: A meta-analysis of observational studies. *PLOS ONE*, 13(12), Article e0209086.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209086>

- Bui, L. P., Pham, T. T., Wang, F., Chai, B., Sun, Q., Hu, F. B., & Shan, Z. (2024). Planetary Health Diet Index and risk of total and cause-specific mortality in three prospective cohorts. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 120(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2024.03.019>
- Burén, J., Ericsson, M., Damasceno, N. R. T., & Sjödin, A. (2021). A ketogenic low-carbohydrate high-fat diet increases LDL cholesterol in healthy, young, normal-weight women: A randomized controlled feeding trial. *Nutrients*, 13(3), Article 814. <https://doi.org/10.3390/nu13030814>
- Chawla, S., Tessarolo Silva, F., Amaral Medeiros, S., Mekary, R. A., & Radenkovic, D. (2020). The effect of low-fat and low-carbohydrate diets on weight loss and lipid levels: A systematic review and meta-analysis. *Nutrients*, 12(12), Article 3774. <https://doi.org/10.3390/nu12123774>
- Clark, M. A., Springmann, M., Hill, J., & Tilman, D. (2019). Multiple health and environmental impacts of foods. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(46), 23357–23362. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906908116>
- Cordain, L., Eaton, S. B., Sebastian, A., Mann, N., Lindeberg, S., Watkins, B. A., O’Keefe, J. H., & Brand-Miller, J. (2005). Origins and evolution of the Western diet: Health implications for the 21st century. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(2), 341-354. <https://doi.org/10.1093/ajcn.81.2.341>

- Craig, W. J., Mangels, A. R., Fresán, U., Marsh, K., Miles, F. L., Saunders, A. V., Haddad, E. H., Heskey, C. E., Johnston, P., Larson-Meyer, E., & Orlich, M. (2021). The safe and effective use of plant-based diets with guidelines for health professionals. *Nutrients*, 13(11), Article 4144. <https://doi.org/10.3390/nu13114144>
- de Menezes, E. V. A., Sampaio, H. A. C., Carioca, A. A. F., Parente, N. A., Brito, F. O., Moreira, T. M. M., & de Souza, A. C. C. (2019). Influence of Paleolithic diet on anthropometric markers in chronic diseases: Systematic review and meta-analysis. *Nutrition Journal*, 18, Article 41. <https://doi.org/10.1186/s12937-019-0457-z>
- Derbyshire, E. J. (2017). Flexitarian diets and health: A review of the evidence-based literature. *Frontiers in Nutrition*, 3, Article 55. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00055>
- Dernini, S., Berry, E. M., Serra-Majem, L., La Vecchia, C., Capone, R., Medina, F. X., Aranceta-Bartrina, J., Belahsen, R., Burlingame, B., Calabrese, G., Corella, D., Donini, L. M., Lairon, D., Meybeck, A., Pekcan, A. G., Piscopo, S., Yngve, A., & Trichopoulou, A. (2017). Med Diet 4.0: The Mediterranean diet with four sustainable benefits. *Public Health Nutrition*, 20(7), 1322–1330. <https://doi.org/10.1017/S1368980016003177>
- Dinu, M., Abbate, R., Gensini, G. F., Casini, A., & Sofi, F. (2017). Vegetarian, vegan diets and multiple health outcomes: A

- systematic review with meta-analysis of observational studies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(17), 3640–3649. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1138447>
- Dinu, M., Pagliai, G., Casini, A., & Sofi, F. (2018). Mediterranean diet and multiple health outcomes: An umbrella review of meta-analyses of observational studies and randomised trials. *European Journal of Clinical Nutrition*, 72(1), 30–43. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2017.58>
- Dong, T., Guo, M., Zhang, P., Sun, G., & Chen, B. (2020). The effects of low-carbohydrate diets on cardiovascular risk factors: A meta-analysis. *PLOS ONE*, 15(1), Article e0225348. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225348>
- Dybvik, J. S., Svendsen, M., & Aune, D. (2022). Vegetarian and vegan diets and the risk of cardiovascular disease, ischemic heart disease and stroke: A systematic review and meta-analysis of prospective cohort studies. *European Journal of Nutrition*, 62, 51–69. <https://doi.org/10.1007/s00394-022-02942-8>
- Eaton, S. B., & Konner, M. (1985). Paleolithic nutrition: A consideration of its nature and current implications. *The New England Journal of Medicine*, 312(5), 283–289. <https://doi.org/10.1056/NEJM198501313120505>
- Eaton, S. B., Eaton, S. B. III, & Konner, M. J. (1997). Paleolithic nutrition revisited: A twelve-year retrospective on its nature

- and implications. *European Journal of Clinical Nutrition*, 51(4), 207–216. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600389>
- Esposito, K., Kastorini, C. M., Panagiotakos, D. B., & Giugliano, D. (2011). Mediterranean diet and weight loss: Meta-analysis of randomized controlled trials. *Metabolic Syndrome and Related Disorders*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1089/met.2010.0031>
- Estruch, R., Ros, E., Salas-Salvadó, J., Covas, M. I., Corella, D., Arós, F., Gómez-Gracia, E., Ruiz-Gutiérrez, V., Fiol, M., Lapetra, J., ve ark. (2018). Primary prevention of cardiovascular disease with a Mediterranean diet supplemented with extra-virgin olive oil or nuts. *The New England Journal of Medicine*, 378(25), Article e34. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1800389>
- Filippou, C. D., Tsioufis, C. P., Thomopoulos, C. G., Mihas, C. C., Dimitriadis, K. S., Sotiropoulou, L. I., Chrysochoou, C. A., Nihoyannopoulos, P. I., & Tousoulis, D. M. (2020). Dietary Approaches to Stop Hypertension (DASH) diet and blood pressure reduction in adults with and without hypertension: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Advances in Nutrition*, 11(5), 1150–1160. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa041>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). The state of food and agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction. FAO.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations, & World Health Organization. (2019). Sustainable healthy diets: Guiding principles. FAO and WHO.
- Foster, G. D., Wyatt, H. R., Hill, J. O., McGuckin, B. G., Brill, C., Mohammed, B. S., Szapary, P. O., Rader, D. J., Edman, J. S., & Klein, S. (2003). A randomized trial of a low-carbohydrate diet for obesity. *The New England Journal of Medicine*, 348(21), 2082–2090. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa022207>
- Foster, G. D., Wyatt, H. R., Hill, J. O., Makris, A. P., Rosenbaum, D. L., Brill, C., Stein, R. I., Mohammed, B. S., Miller, B., Rader, D. J., ve ark. (2010). Weight and metabolic outcomes after 2 years on a low-carbohydrate versus low-fat diet: A randomized trial. *Annals of Internal Medicine*, 153(3), 147–157. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-153-3-201008030-00005>
- Frączek, B., Pięta, A., Burda, A., Mazur-Kurach, P., & Tyrała, F. (2021). Paleolithic diet—Effect on the health status and performance of athletes? *Nutrients*, 13(3), Article 1019. <https://doi.org/10.3390/nu13031019>
- Gardner, C. D., Kiazand, A., Alhassan, S., Kim, S., Stafford, R. S., Balise, R. R., Kraemer, H. C., & King, A. C. (2007). Comparison of the Atkins, Zone, Ornish, and LEARN diets for change in weight and related risk factors among overweight premenopausal women: The A TO Z Weight

- Loss Study. JAMA, 297(9), 969–977.
<https://doi.org/10.1001/jama.297.9.969>
- Gardner, C. D., Trepanowski, J. F., Del Gobbo, L. C., Hauser, M. E., Rigdon, J., Ioannidis, J. P. A., Desai, M., & King, A. C. (2018). Effect of low-fat vs low-carbohydrate diet on 12-month weight loss in overweight adults and the association with genotype pattern or insulin secretion: The DIETFITS randomized clinical trial. JAMA, 319(7), 667–679.
<https://doi.org/10.1001/jama.2018.0245>
- Gephart, J. A., Henriksson, P. J. G., Parker, R. W. R., Shepon, A., Gorospe, K. D., Bergman, K., Eshel, G., Golden, C. D., Halpern, B. S., Hornborg, S., Jonell, M., Metian, M., Mifflin, K., Newton, R., Tyedmers, P., Zhang, W., Ziegler, F., & Troell, M. (2021). Environmental performance of blue foods. Nature, 597(7876), 360–365.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03889-2>
- Ghaedi, E., Mohammadi, M., Mohammadi, H., Ramezani-Jolfaie, N., Malekzadeh, J., Hosseinzadeh, M., & Salehi-Abargouei, A. (2019). Effects of a Paleolithic diet on cardiovascular disease risk factors: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Advances in Nutrition, 10(4), 634–646. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz007>
- Ghasemi, P., Naghshi, S., Mirmiran, P., & Azadbakht, L. (2024). Impact of very low carbohydrate ketogenic diets on cardiovascular risk factors among patients with type 2

- diabetes; GRADE-assessed systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Nutrition & Metabolism*, 21, Article 50. <https://doi.org/10.1186/s12986-024-00824-w>
- Gibbs, J., Gaskin, E., Ji, C., Miller, M. A., & Cappuccio, F. P. (2021). The effect of plant-based dietary patterns on blood pressure: A systematic review and meta-analysis of controlled intervention trials. *Journal of Hypertension*, 39(1), 23–37. <https://doi.org/10.1097/HJH.0000000000002604>
- Goldenberg, J. Z., Day, A., Brinkworth, G. D., Sato, J., Yamada, S., Jönsson, T., Beardsley, J., Johnson, J. A., Thabane, L., & Johnston, B. C. (2021). Efficacy and safety of low and very low carbohydrate diets for type 2 diabetes remission: Systematic review and meta-analysis of published and unpublished randomized trial data. *BMJ*, 372, Article m4743. <https://doi.org/10.1136/bmj.m4743>
- Guasch-Ferré, M., & Willett, W. C. (2021). The Mediterranean diet and health: A comprehensive overview. *Journal of Internal Medicine*, 290(3), 549–566. <https://doi.org/10.1111/joim.13333>
- Hallström, E., Carlsson-Kanyama, A., & Börjesson, P. (2015). Environmental impact of dietary change: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 91, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.008>
- Hemler, E. C., & Hu, F. B. (2019). Plant-based diets for personal, population, and planetary health. *Advances in Nutrition*,

- 10(Suppl_4), S275–S283.
<https://doi.org/10.1093/advances/nmy117>
- Hirvonen, K., Bai, Y., Headey, D., & Masters, W. A. (2020). Affordability of the EAT–Lancet reference diet: A global analysis. *The Lancet Global Health*, 8(1), e59–e66.
[https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30447-4](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30447-4)
- Hu, T., Bazzano, L. A., & Hu, F. B. (2014). The low-carbohydrate diet and cardiovascular risk factors: Evidence from epidemiologic studies. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 24(4), 337–343.
<https://doi.org/10.1016/j.numecd.2013.12.008>
- International Diabetes Federation. (2025). *IDF diabetes atlas* (11th ed.). International Diabetes Federation.
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. ISO.
- Jamka, M., Kulczyński, B., Juruć, A., Gramza-Michałowska, A., Stokes, C. S., Walkowiak, J., & Jeszka, J. (2020). The effect of the Paleolithic diet vs. healthy diets on glucose and insulin homeostasis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2), Article 296. <https://doi.org/10.3390/jcm9020296>
- Joo, M., Moon, S., Choi, Y. J., Kim, S., & Park, K. (2023). Effects of very low-carbohydrate ketogenic diets on lipid profiles in

- normal-weight adults: A meta-analysis. *Nutrition Reviews*, 81(11), 1393–1401. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuad017>
- Jönsson, T., Granfeldt, Y., Åhrén, B., Bränell, U. C., Pålsson, G., Hansson, A., Söderström, M., & Lindeberg, S. (2009). Beneficial effects of a Paleolithic diet on cardiovascular risk factors in type 2 diabetes: A randomized cross-over pilot study. *Cardiovascular Diabetology*, 8, Article 35. <https://doi.org/10.1186/1475-2840-8-35>
- Keys, A. (1980). *Seven countries: A multivariate analysis of death and coronary heart disease*. Harvard University Press.
- Kossoff, E. H., Zupec-Kania, B. A., Auvin, S., Ballaban-Gil, K. R., Christina Bergqvist, A. G., Blackford, R., Buchhalter, J. R., Caraballo, R. H., Cross, J. H., Dahlin, M. G., ve ark. (2018). Optimal clinical management of children receiving dietary therapies for epilepsy: Updated recommendations of the International Ketogenic Diet Study Group. *Epilepsia Open*, 3(2), 175–192. <https://doi.org/10.1002/epi4.12225>
- Mahmoud, S. H., Ho-Huang, E., Buhler, J., Cooke, E., Dilling, H., & Nashef, L. (2019). Systematic review of ketogenic diet use in adult patients with status epilepticus. *Epilepsia Open*, 5(1), 10–21. <https://doi.org/10.1002/epi4.12370>
- Manheimer, E. W., van Zuuren, E. J., Fedorowicz, Z., & Pijl, H. (2015). Paleolithic nutrition for metabolic syndrome: Systematic review and meta-analysis. *The American Journal*

- of Clinical Nutrition, 102(4), 922–932.
<https://doi.org/10.3945/ajcn.115.113613>
- Mansoor, N., Vinknes, K. J., Veierød, M. B., & Retterstøl, K. (2016). Effects of low-carbohydrate diets versus low-fat diets on body weight and cardiovascular risk factors: A meta-analysis of randomised controlled trials. *British Journal of Nutrition*, 115(3), 466–479.
<https://doi.org/10.1017/S0007114515004699>
- Martínez-González, M. A., Salas-Salvadó, J., Estruch, R., Corella, D., Fitó, M., Ros, E., & PREDIMED Investigators. (2015). Benefits of the Mediterranean diet: Insights from the PREDIMED study. *Progress in Cardiovascular Diseases*, 58(1), 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2015.04.003>
- Melina, V., Craig, W., & Levin, S. (2016). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Vegetarian diets. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 116(12), 1970–1980.
<https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.09.025>
- Monsivais, P., Scarborough, P., Lloyd, T., Mizdrak, A., Luben, R., Mulligan, A. A., Wareham, N. J., & Woodcock, J. (2015). Greater accordance with the Dietary Approaches to Stop Hypertension dietary pattern is associated with lower diet-related greenhouse gas production but higher dietary costs in the United Kingdom. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 102(1), 138–145.
<https://doi.org/10.3945/ajcn.114.090639>

- Monteiro, C. A., Cannon, G., Lawrence, M., Costa Louzada, M. L., & Pereira Machado, P. (2019). Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system.
- Morris, M. C., Tangney, C. C., Wang, Y., Sacks, F. M., Barnes, L. L., Bennett, D. A., & Aggarwal, N. T. (2015). MIND diet associated with reduced incidence of Alzheimer's disease. *Alzheimer's & Dementia*, 11(9), 1007–1014. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2014.11.009>
- National Heart, Lung, and Blood Institute. (2026). DASH eating plan. National Institutes of Health.
- Neufingerl, N., & Eilander, A. (2021). Nutrient intake and status in adults consuming plant-based diets compared to meat-eaters: A systematic review. *Nutrients*, 14(1), Article 29. <https://doi.org/10.3390/nu14010029>
- O'Malley, K., Willits-Smith, A., & Rose, D. (2023). Popular diets as selected by adults in the United States show wide variation in carbon footprints and diet quality. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 117(4), 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2023.01.009>
- Orlich, M. J., Singh, P. N., Sabaté, J., Jaceldo-Siegl, K., Fan, J., Knutsen, S., Beeson, W. L., & Fraser, G. E. (2013). Vegetarian dietary patterns and mortality in Adventist Health Study 2. *JAMA Internal Medicine*, 173(13), 1230–1238. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2013.6473>

- Orlich, M. J., Singh, P. N., Sabaté, J., Fan, J., Sveen, L., Bennett, H., Knutsen, S. F., Beeson, W. L., Jaceldo-Siegl, K., Butler, T. L., Herring, R. P., & Fraser, G. E. (2015). Vegetarian dietary patterns and the risk of colorectal cancers. *JAMA Internal Medicine*, 175(5), 767–776. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2015.59>
- Paoli, A., Rubini, A., Volek, J. S., & Grimaldi, K. A. (2013). Beyond weight loss: A review of the therapeutic uses of very-low-carbohydrate ketogenic diets. *European Journal of Clinical Nutrition*, 67(8), 789–796. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2013.116>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Reynolds, A., Mann, J., Cummings, J., Winter, N., Mete, E., & Te Morenga, L. (2019). Carbohydrate quality and human health: A series of systematic reviews and meta-analyses. *The Lancet*, 393(10170), 434–445. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31809-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31809-9)
- Rimm, E. B., Appel, L. J., Chiuve, S. E., Djoussé, L., Engler, M. B., Kris-Etherton, P. M., Mozaffarian, D., Siscovick, D. S., & Lichtenstein, A. H. (2018). Seafood long-chain n-3 polyunsaturated fatty acids and cardiovascular disease: A science advisory from the American Heart Association.

- Circulation, 138(1), e35–e47.
<https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000574>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., & others. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475.
<https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H. F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T. E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., & Hauschild, M. Z. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7), 532–546. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>
- Ruan, Y., Chen, L., She, D., Chung, Y., Ge, L., Han, L., & Zhang, L. (2022). Ketogenic diet for epilepsy: An overview of systematic review and meta-analysis. *European Journal of Clinical Nutrition*, 76, 1234–1244.
<https://doi.org/10.1038/s41430-021-01060-8>
- Sacks, F. M., Svetkey, L. P., Vollmer, W. M., Appel, L. J., Bray, G. A., Harsha, D., Obarzanek, E., Conlin, P. R., Miller, E. R., III, Simons-Morton, D. G., Karanja, N., & Lin, P. H. (2001). Effects on blood pressure of reduced dietary sodium and the

- Dietary Approaches to Stop Hypertension diet. *The New England Journal of Medicine*, 344(1), 3–10.
<https://doi.org/10.1056/NEJM200101043440101>
- Sáez-Almendros, S., Obrador, B., Bach-Faig, A., & Serra-Majem, L. (2013). Environmental footprints of Mediterranean versus Western dietary patterns: Beyond the health benefits of the Mediterranean diet. *Environmental Health*, 12, Article 118.
<https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-118>
- Saneei, P., Salehi-Abargouei, A., Esmailzadeh, A., & Azadbakht, L. (2014). Influence of Dietary Approaches to Stop Hypertension (DASH) diet on blood pressure: A systematic review and meta-analysis on randomized controlled trials. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 24(12), 1253–1261. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2014.06.008>
- Satija, A., Bhupathiraju, S. N., Spiegelman, D., Chiuve, S. E., Manson, J. E., Willett, W., Rexrode, K. M., Rimm, E. B., & Hu, F. B. (2017). Healthful and unhealthful plant-based diets and the risk of coronary heart disease in U.S. adults. *Journal of the American College of Cardiology*, 70(4), 411–422.
<https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.05.047>
- Scarborough, P., Appleby, P. N., Mizdrak, A., Briggs, A. D. M., Travis, R. C., Bradbury, K. E., & Key, T. J. (2014). Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic Change*, 125, 179–192. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1169-1>

- Scarborough, P., Clark, M., Cobiac, L., Papier, K., Knuppel, A., Lynch, J., Harrington, R. A., Key, T., & Springmann, M. (2023). Vegans, vegetarians, fish-eaters and meat-eaters in the UK show discrepant environmental impacts. *Nature Food*,4,565–574.<https://doi.org/10.1038/s43016-023-00795-w>
- Schwingshackl, L., Chaimani, A., Schwedhelm, C., Toledo, E., Püsch, M., Hoffmann, G., Boeing, H., & Trichopoulou, A. (2019). Comparative effects of different dietary approaches on blood pressure in hypertensive and pre-hypertensive patients: A systematic review and network meta-analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(16), 2674–2687.<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1463967>
- Shai, I., Schwarzfuchs, D., Henkin, Y., Shahar, D. R., Witkow, S., Greenberg, I., Golan, R., Fraser, D., Bolotin, A., Vardi, H., et al. (2008). Weight loss with a low-carbohydrate, Mediterranean, or low-fat diet. *The New England Journal of Medicine*,359(3),229–241.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa0708681>
- Sofi, F., Macchi, C., Abbate, R., Gensini, G. F., & Casini, A. (2014). Mediterranean diet and health status: An updated meta-analysis and a proposal for a literature-based adherence score. *Public Health Nutrition*, 17(12), 2769–2782.
<https://doi.org/10.1017/S1368980013003169>

- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S. J., Herrero, M., Carlson, K. M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L. J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., ... Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Stern, L., Iqbal, N., Seshadri, P., Chicano, K. L., Daily, D. A., McGrory, J., Williams, M., Gracely, E. J., & Samaha, F. F. (2004). The effects of low-carbohydrate versus conventional weight loss diets in severely obese adults: One-year follow-up of a randomized trial. *Annals of Internal Medicine*, 140(10), 778–785. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-140-10-200405180-00007>
- Tepper, S., Geva, D., Shahar, D. R., & Shepon, A. (2022). The environmental footprint associated with the Mediterranean diet, EAT-Lancet diet, and the Sustainable Healthy Diet Index: A population-based study. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 870883. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.870883>
- Tian, W., Cao, S., Guan, Y., Zhang, Z., Liu, Q., Ju, J., Xi, R., & Bai, R. (2025). The effects of low-carbohydrate diet on glucose and lipid metabolism in overweight or obese patients with type 2 diabetes mellitus: A meta-analysis of randomized

- controlled trials. *Frontiers in Nutrition*, 11, Article 1516086.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1516086>
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- Trichopoulou, A., Costacou, T., Bamia, C., & Trichopoulos, D. (2003). Adherence to a Mediterranean diet and survival in a Greek population. *The New England Journal of Medicine*, 348(26), 2599–2608. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa025039>
- U.S. Food and Drug Administration, & U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Advice about eating fish. U.S. Food and Drug Administration.
- United Nations Environment Programme. (2024). Food waste index report 2024: Think eat save. UNEP.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- World Health Organization. (2025). Obesity and overweight. World Health Organization.

BÖLÜM 10

ADLAY TAHILI (*Coix lacryma-jobi* L.): BESİN BİLEŞİMİ, İŞLEME TEKNOLOJİLERİ VE BİYOYARARLANIMI

Mahir Serdar YILMAZ¹

Giriş

Tarımsal üretim, küresel ekonominin hayati bir parçası ve insan uygarlığının temel itici güçlerinden biri olagelmıştır; ancak bölgeye özgü bazı tarım ürünleri yüzyıllar boyunca ihmal edilmiş ya da yeterince tanınmamıştır. İklim değişikliği ve gıda-beslenme güvenliği gibi değişen küresel koşullar, bu ürünlere yönelik ilgiyi giderek artırmaktadır. Bitkisel kaynaklı türler; alternatif gıda, katkı maddesi, lezzet ve renk kaynağı olarak kullanılabilmelerinin yanı sıra içerdikleri biyokimyasal bileşenler nedeniyle fonksiyonel gıda sistemlerinde de değerli kaynaklar olarak değerlendirilmektedir (Andriana ve ark., 2023).

Adlay (*Coix lacryma-jobi* L.), Poaceae familyasının Panicoideae alt familyasına ait, mısır ve sorgumla yakın akraba bir tahıldır (Corke ve ark., 2016). "Job's tears", "Hatomugi" veya "Yi Yi

¹ Adıyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, 02040 Orcid: 0000-0003-3748-0389 serdaryilmaz@adiyaman.edu.tr

Ren" adlarıyla da bilinen bu bitki, özellikle Güneydoğu Asya'da yüzyıllardır gıda ve geleneksel tıp alanında kullanılmakta; son yıllarda ise iklim değişikliği ve sürdürülebilir gıda talebindeki artışla birlikte yeniden ilgi odağı haline gelmektedir (Zhu, 2017; Andriana ve ark., 2023).

Adlay, tahıllar arasında istisnai bir protein içeriğine (%14–20) sahip olup bu oranıyla pirinç, buğday ve mısırı geride bırakmaktadır. Başlıca depolama proteini olan coixin, kükürtlü amino asitler (metiyonin ve sistein) bakımından zengindir (Kang ve ark., 2020; Zhu, 2017). Yaklaşık %5-10 oranındaki lipit içeriğinin büyük kısmını oleik ve linoleik asit gibi doymamış yağ asitleri oluşturmakta; zengin vitamin (B1, B2, E, niasin) ve mineral (kalsiyum, fosfor, demir, çinko) profiliyle adlay, besinsel açıdan dengeli bir gıda maddesi olarak öne çıkmaktadır (Bhandari ve ark., 2012; Igboke ve ark., 2022).

Gıda teknolojisi açısından adlayın önemli avantajlarından biri doğal olarak gluten içermemesidir; bu özellik çölyak hastaları ve gluten intoleransı olan bireyler için buğday ununa güvenli bir alternatif sunmaktadır (Comino ve ark., 2013). Düşük glisemik indeks (35–55) ve glisemik yük (9) değerleriyle de metabolik sağlık üzerinde olumlu etkilere sahiptir (Lin ve ark., 2010). Bununla birlikte adlayın sert tohum yapısı ve yoğun dış katmanları doğrudan tüketimi zorlaştırmakta; pişirme süresinin uzamasına ve su absorpsiyonunun düşmesine neden olmaktadır (Ding ve ark., 2022). Bu sınırlılıkların aşılmasında ekstrüzyon, yüksek hidrostatik basınç, ultra ince öğütme ve fermentasyon gibi işleme yöntemleri devreye girerken (Zeng ve ark., 2022), yüksek doymamış yağ asidi içeriğinin beraberinde getirdiği oksidatif bozulma riski nedeniyle nanoemülsiyon, lipozom ve nanokafes sistemleri gibi stabilizasyon stratejileri de geliştirilmektedir (Zheng ve ark., 2021).

Bu bölüm; adlay tahılının besin bileşimi, reolojik özellikleri, işleme teknolojileri ve gıda yapısındaki biyoyararlanımını gıda

bilimi perspektifinden kapsamlı biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Ulusal literatürde bu tahıla yönelik ilk kaynak niteliğini taşıyan bu çalışma, Türkiye'de geleneksel olarak sadece süs eşyası yapımıyla sınırlı kalan adlay üretiminin endüstriyel gıda sistemlerindeki uygulanma potansiyeline de ışık tutmaktadır. Temel hedef; söz konusu az değerlendirilmiş hammaddeye dair ulusal düzeyde teknik bir kaynak oluşturmak ve bitkinin fonksiyonel gıda endüstrisindeki katma değerli kullanım imkanlarını ortaya koymaktır.

Botanik ve Morfolojik Özellikler

Adlay (*Coix lacryma-jobi* L.), Poaceae familyasına ait panikoid bir ot olup mısır (*Zea mays* L.) ve sorgum (*Sorghum bicolor* L.) ile akrabadır. "Gözyaşı otu", Job's tear, mayuen, Çin inci arpası, hanjeli veya hatomugi olarak da bilinen bu bitkinin kökeni ve gen havuzu merkezi güneybatı Çin olup arkeolojik bulgulara göre yaklaşık 8.000 yıllık bir yetiştirilme geçmişine sahiptir (Guo ve ark., 2020). Güçlü uyum kabiliyeti sergileyen adlay, kuraklığa ve sele dayanıklı olup diğer buğdaygillere kıyasla hasat ve depolama süreçleri daha kolaydır. Esas olarak subtropikal bölgelerde, hendek, nehir ve tarla kenarları gibi nemli ortamlarda yayılım gösteren bitki; Doğu, Güney ve Güneydoğu Asya'da hem yabani hem de kültür bitkisi olarak yetişmektedir. Çin'de adlay tohumu ekim alanı 2019 itibarıyla 181.211 dönüme ulaşmış, yıllık üretim ise 550.000 ton olarak gerçekleşmiştir (Ding ve ark., 2022).

Temmuz–Eylül ayları arasında çiçek açan, Eylül–Ekim aylarında meyve veren adlay; 120–180 cm yüksekliğe ulaşabilen tek ya da çok yıllık bir bitkidir. Geniş yaprak yapısı, toprak stresine ve çoraklığa toleransı, geniş ekim alanlarına uyumu ve çevre dostu niteliğiyle öne çıkmaktadır (Chaisiricharoenkul ve ark., 2011).

Adlayın yenilebilir kısmı; protein oranı yüksek, yağ oranı orta ve şeker oranı düşük olan tohum çekirdeğidir. Tohumlar şekil,

boyut, renk ve tekstür ölçütlerine göre sınıflandırılmakta; renk bakımından beyaz, sarı-beyaz, gri, kahverengi, koyu kahverengi ve siyah olmak üzere altı farklı özellik sergilemektedir. Yumuşak kabuklu formlar açık renkli, sert kabuklu formlar ise koyu perikarp yapısına sahiptir (Xi ve ark., 2016). Tohumun dört temel yapısal katmanı bulunmaktadır: kabuk, testa, kepek ve endosperm. Tüketicilerin parlak beyaz ürünlere olan tercihleri nedeniyle tahılın %5–10'unu oluşturan kepek tabakası çoğunlukla uzaklaştırılarak taneler parlatılmaktadır (Bon ve ark., 2023). Bitkinin görünümü ve tohum yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. (A) Adlay bitkisi, (B) kabuklu tohumlar (C) kabuksuz tohumlar (Huang ve ark., 2021)

Adlay bitkisinin yabani ve kültür olmak üzere iki temel formu bulunmaktadır. Yabani form olan *Coix lacryma-jobi* var. *lacryma-jobi*, gözyaşı biçimli, oval yapılı ve sert kabuklu tohumlara sahip olup bu tohumlar tespih, kolye, bilezik ve çeşitli süs eşyalarının yapımında kullanılmaktadır (Jiang ve ark., 2008). Kültür çeşidi olan *Coix lacryma-jobi* var. *ma-yuen* ise yumuşak kabuklu olup tahıl ürünü olarak hasat edilmektedir; tane rengi beyazımsı kremden kahverengi, gri veya siyaha, tane şekli ise boncuk biçiminden uzun forma uzanan geniş bir çeşitlilik göstermektedir (Bon ve ark., 2023) (Şekil 2).



C. lacryma-jobi L. var.
maxima Makino

C. lacryma-jobi L. var.
lacryma-jobi

C. lacryma-jobi L. var.
monilifer Watt

C. lacryma-jobi L.
var. *mayuen* Stapf

Şekil 2. Farklı adlay türlerine ait tohum kapsülleri (Weng ve ark., 2022)

Adlay, sonbaharda olgunlaşınca hasat edilip açık havada kurutulan; ardından dış kabuk, tohum kabuğu ve kavuz uzaklaştırılarak beyaz iç tohumları elde edilen bir tahıldır. 4–8 mm uzunluğunda ve 3–6 mm genişliğindeki bu çekirdekler; bir ucu küt ve yuvarlak, diğer ucu daha geniş ve hafif içbükey yapıda olup açık kahverengi bir hiluma sahiptir. Kremsti ve tatlı bir lezzete, çiğnenebilir bir dokuya sahip olan taneler; salata, pilav, çorba ve çeşitli gıdalarda ek bileşen olarak kullanılabilir (Weng ve ark., 2022).

Temel Besin Kompozisyonu ve Termofiziksel Özellikler

Makro ve Mikro Besin Öğeleri

Adlay tohumunun kimyasal bileşimine ilişkin araştırmalar 1960'lı yıllarda başlamış olup günümüze dek proteinler, amino asitler, vitaminler, lipitler, steroller ve fenoller dahil 70'ten fazla bileşik izole edilmiştir (Weng ve ark., 2022). Adlay tohumları, sekizi esansiyel olmak üzere toplam 18 amino asit içeren, biyolojik değeri yüksek ve dengeli bir amino asit kompozisyonuna sahiptir. Tanelerdeki toplam amino asit içeriği %19,72 ile pirincin yaklaşık 2,2 katı düzeyine ulaşmaktadır (Weng ve ark., 2022). Tohumlar glutamat, prolin ve lösin bakımından zengin bir profile sahipken lisin sınırlayıcı amino asit konumundadır; bununla birlikte lisinin mutlak seviyesi pirinç, mısır ve buğday gibi temel tahıllardan daha yüksektir (Liu ve ark., 2015). Bitkinin farklı organlarındaki temel besinsel bileşenlerin karşılaştırmalı dağılımı Tablo 1'te sunulmaktadır.

Tablo 1. Adlay bitkisinin farklı kısımlarında bulunan besinsel ve fonksiyonel bileşenler (Zeng ve ark., 2022; Wang ve ark., 2016)

Bileşen	Tohum	Kabuk	Gövde	Kök	Sap	Yaprak
Kül (%)	2,65	15,68	21,32	5,89	1,83	14,70
Protein (%)	19,33	10,85	7,56	19,06	12,07	18,29
Ham lif (%)	2,05	53,56	45,43	28,78	43,44	18,95
Ham yağ (%)	4,70	5,31	4,52	7,15	2,44	0,38
Nişasta (%)	48,58	3,55	4,56	6,78	8,89	3,21
E Vitamini (mg/kg)	86,61	106,85	119,27	146,50	109,32	112,36
C Vitamini (mg/kg)	0,11	0,08	0,12	0,26	0,28	0,31
B1 Vitamini (mg/kg)	0,51	0,56	0,42	0,61	0,44	0,58
B2 Vitamini (mg/kg)	0,62	0,78	1,28	2,96	1,66	0,99
B6 Vitamini (mg/kg)	8,38	9,09	12,66	21,64	7,72	40,07
B12 Vitamini (mg/kg)	0,54	0,66	—	1,32	0,43	0,89
K (mg/kg)	2165,50	2294,61	1987,05	3714,79	2468,96	4175,83
Ca (mg/kg)	305,39	609,51	875,69	1845,33	1374,30	15645,02
Na (mg/kg)	1020,42	1231,67	1393,59	877,92	1060,83	1904,38
Mg (mg/kg)	1212,29	1481,48	1567,37	2385,63	2283,13	5845,83
Zn (mg/kg)	146,83	88,93	91,36	84,01	20,91	41,22
Fe (mg/kg)	116,23	107,89	90,47	1459,28	98,92	367,18
P (mg/kg)	1933,20	323,93	318,92	849,51	391,89	1405,92
Stearik asit (%)	5,64	2,35	1,96	3,35	2,12	2,93
Oleik asit (%)	40,59	43,55	21,17	26,74	43,87	46,11
Linoleik asit (%)	26,53	31,18	14,49	18,78	29,88	33,47
Flavonoidler (mg/g)	2,26	0,13	0,09	0,21	0,44	2,13
Toplam fenol (mg/g)	0,27	1,89	1,04	4,53	3,07	3,15

Bitkinin temel depolama proteini olan coixin, kükürtlü amino asitler (metiyonin ve sistein) ve mikro besin öğeleri bakımından zengin olup bu özelliğiyle diğer tahıllardan ayrılmaktadır (Kang ve ark., 2020; Zhu, 2017). Adlay, lipid çözünürlüklü antioksidanlar olan vitamin E izomerleri açısından da değerli bir kaynaktır; tohum yağındaki toplam tokoferol miktarı 0,64–1,57 mg/g arasında değişmekte ve bu değer zeytinyağı gibi prestijli yağ kaynaklarını dahi geride bırakmaktadır (Chang ve ark., 2020). Vitamin E ailesinin

temel bileşenlerini γ -tokoferol ve γ -tokotrienol oluşturmaktadır (Bhandari ve ark., 2012). Mineral kompozisyonu açısından adlay; kalsiyum, magnezyum, fosfor, demir, çinko ve manganezin biyolojik olarak ulaşılabilir bir kaynağıdır (Igbokwe ve ark., 2022). Fosfor ve çinko tohum çekirdeğinde yoğunlaşmış olup konsantrasyonları sırasıyla 1,93 mg/g ve 0,15 mg/g seviyesindedir; yapraklardaki kalsiyum içeriğinin 15,65 mg/g gibi dikkat çekici bir değere ulaşması ise adlayın fonksiyonel gıda takviyesi hammaddesi olarak potansiyelini pekiştirmektedir (Weng ve ark., 2022).

Diyet Lifi: Adlay tohumları, varyetesine ve uygulanan işleme tekniklerine bağlı olarak %2,0–%8,4 arasında diyet lifi içermekte olup bu oran parlatılmış beyaz pirinçle (%4,5) kıyaslandığında rekabetçi bir seviyededir (Zeng ve ark., 2022). Adlaydaki diyet lifi profili temel olarak arabinoksilanlar gibi nişasta olmayan polisakkaritler ile fruktooligosakkaritlerden oluşmaktadır (Huda ve ark., 2023). İşlenmemiş bazı tam tahılların diyet lifi içerikleri Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2. İşlenmemiş bazı tam tahılların diyet lifi içeriği (Li ve ark., 2024)

İşlenmemiş Tahıllar	Tam	Nem (%)	TDF (g/100 g KM)	İDF (g/100 g KM)	SDF (g/100 g KM)
Kinoa		10,23	9,70	7,29	2,41
Karabuğday		11,99	6,52	5,34	1,18
Yulaf		10,09	10,61	7,45	3,16
Arpa		12,81	10,30	6,38	3,92
Tilkikuyruğu darısı		12,59	3,49	3,15	0,35
Proso darısı		11,18	3,47	2,82	0,65
Sorgum		11,28	1,86	1,31	0,55
Adlay		10,64	3,86	3,14	0,72

TDF: Toplam diyet lifi; IDF: Çözünmez diyet lifi; SDF: Çözünür diyet lifi; KM: Kuru madde

Fenolik Bileşenler ve Antioksidan Aktivite: Adlay tohumundan elde edilen fraksiyonlarda fenolik asit, fenolik ester, fenolik aldehit, flavonoid, triterpenoid, sterol, laktam, lakton ve

lignan olmak üzere dokuz ana fitokimyasal bileşen grubu izole edilmiştir (Chang ve ark., 2020). Beyaz ve siyah kabuklu adlay tanelerinin tam tahıl ve yağı alınmış un formlarına ait antioksidan özellikler Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Tam tahıl ve yağı alınmış adlay unlarının metanol ekstraktlarının antioksidan özellikleri (Choi ve ark., 2007)

Örnek	Total Fenolik İçerik (mg GAE/g)	DPPH Aktivitesi (%)	İndirgeme Gücü (A700)
Tam tahıl beyaz adlay unu	7,33	5,40	2,88
Tam tahıl siyah adlay unu	7,93	6,49	2,56
Ruşeymsiz beyaz adlay unu	7,05	6,56	2,69
Ruşeymsiz siyah adlay unu	8,18	7,53	2,64

Fitosteroller: β -sitosterol, tüm adlay örneklerinde baskın bitki sterolü olup toplam sterol içeriğinin %43,2–%55,3'ünü oluşturmaktadır. Adlay kepeğinin fitosterol içeriği (4.733 mg/kg), parlatılmış adlay (1.154 mg/kg) ve adlay kabuğundan (1.114 mg/kg) belirgin biçimde yüksek olduğu gibi mısır (900 mg/kg), sorgum (500 mg/kg) ve yulaf (447 mg/kg) gibi tahılları da aşmaktadır (Piironen ve ark., 2002). Adlayın farklı fraksiyonlarından ekstrakte edilen fitosterollerin içerik ve bileşimi Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Adlay bitkisinin farklı fraksiyonlarına ait fitosterol içerikleri (mg/kg) (Wu ve ark., 2007)

Örnek	Skuale n	Tokofen ol	Kampester ol	Ergostan ol	β -Sitoster ol	Toplam Fitosteroller
Gövde	18,1	14,0	138	186	505	1114
Kepek	82,4	227	349	1434	2215	4733
Parlatılmış Adlay	61,2	51,9	106	213	638	1154

Adlayın Diğer Fonksiyonel Tahıllarla Karşılaştırılması: Adlay, biyokimyasal içeriği bakımından klasik tahıllardan ziyade, günümüzün popüler "süper gıdaları" olarak anılan kinoa, amarant, karabuğday ve yulaf ile fonksiyonel bir rekabet içerisinde. Tablo 5, bu tahılların temel besinsel ve biyoaktif bileşen profillerini toplu halde sunmaktadır.

Tablo 5. Adlay ve bazı fonksiyonel tahılların karşılaştırılması

Bileşen	Adlay	Kinoa	Amarant	Karabuğday	Yulaf*	Kaynaklar
Protein (%)	14,2 – 20,0	13,0 – 16,0	14,0 – 15,0	12,0 – 13,3	12,0 – 15,0	Rodríguez ve ark., 2020;
Toplam Yağ (%)	5,0 – 10,0	5,0 – 9,0	5,0 – 10,0	1,5 – 4,0	3,0 – 7,0	Igbokwe ve ark., 2022
Toplam Karbonhidrat (%)	50,0 – 79,0	53,0 – 64,0	55,0 – 63,0	65,0 – 72,0	60,0 – 66,0	Weng ve ark., 2022
Diyet Lifi (%)	2,0 – 8,4	14,6	7,0	10,0 – 17,8	10,0 – 11,0	Rodríguez ve ark., 2020
Glüten Durumu	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Rodríguez ve ark., 2020
Temel Biyoaktifler	Coixenolide Coixol Coixan	Fitoekdisteroidler Saponinler	Skualen Betainler	Rutin Kuersetin	β-glukan Avenanramidler	Li ve ark., 2024

*Yulaf doğal olarak glutensizdir; ancak üretim zincirinde çapraz kontaminasyon riski bulunabilir.

Adlay Bileşenlerinin Karakterizasyonu

Adlay tohumları, gıda bilimi literatüründe "Coix-" ön ekiyle tanımlanan özgün biyopolimerler ve fitokimyasallar içermekte; bu bileşikler yapısal stabilite, reolojik davranışlar ve biyoaktif taşıyıcı sistemlerin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Zhu, 2017; Zeng ve ark., 2022).

Coixin (Adlay Prolamini): Adlayın başlıca depolama proteini olan coixin, endosperm proteinlerinin önemli bir bölümünü oluşturan

prolamin fraksiyonudur (Ottoboni ve ark., 1990). Coixin tek bir düşük moleköl ağırlıklı bileşik olmayıp farklı alt birimlerden oluşan bir protein fraksiyonu olduğundan sabit bir moleköl formüle sahip değildir. Yüksek hidrofobik karakteri sayesinde yenilebilir film ve biyobozunur kaplamalarda neme karşı etkili bariyer oluşturabilmekte; bitkisel proteinler arasında dikkat çeken düzeyde kükürtlü amino asit içermesi nedeniyle de kompozit gıda sistemlerinde amino asit dengesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Lin ve ark., 2010).

Coixenolide ($C_{38}H_{70}O_4$): Adlay yağının nötr lipid fraksiyonunda bulunan ve bitkiye özgü kabul edilen bu gliserit türevinin izolasyonunda termal stabiliteyi koruyan süperkritik akışkan ekstraksiyonu ve ultrason destekli yöntemler öne çıkmaktadır (Zhu, 2017; Hu ve ark., 2007). Lipofilik yapısı nedeniyle oksidatif degradasyona duyarlı olduğundan stabilitesinin artırılmasında protein-polisakkarit bazlı nanoemülsiyonlar ve lipozomal taşıyıcı sistemlerden yararlanılmaktadır (Zeng ve ark., 2022).

Coixan (Biyoaktif Polisakkaritler): Adlay tohumlarından elde edilen coixanlar, dallanmış yapılı asidik heteroglikanlardır (Zhu, 2017). Coixan tek bir moleköl olmayıp farklı monosakkaritlerden oluşan polisakkarit fraksiyonlarını ifade ettiğinden sabit bir moleköl formüle sahip değildir. Suda çözünür teknofonksiyonel karbonhidratlar olarak yüksek termal stabiliteleri sayesinde fonksiyonel içecekler ile fermente süt ürünlerinde yapılandırıcı ve viskozite düzenleyici işlev görmektedir; fermentasyon süreçlerinde yararlı mikroorganizmalar için karbon kaynağı oluşturarak kısa zincirli yağ asidi üretimini destekleyen prebiyotik özellikler de sergilemektedirler (Li ve ark., 2024; Huda ve ark., 2023; Zeng ve ark., 2022).

Coixol ($C_8H_7NO_3$; 6-metoksi-2-benzoksazolinon): Adlayın karakteristik benzoksazinoidlerinden biri olan coixol, işleme koşullarına bağlı olarak miktarı değişebilen önemli bir metabolittir.

Kontrollü çimlendirme uygulamaları coixol düzeylerini artırarak unun fitokimyasal yoğunluğunu yükseltebilmekte; yüksek erime noktası sayesinde ekstrüzyon ve kavurma gibi yüksek sıcaklıklı işlemlerde belirli ölçüde stabil kalabilmektedir (Li ve ark., 2024; Xu ve ark., 2018; Weng ve ark., 2022).

Bu bileşenlerin bütünü değerlendirildiğinde, adlayın yalnızca besinsel açıdan değil yapısal ve teknolojik özellikleri bakımından da fonksiyonel gıda uygulamaları için önemli bir hammadde olduğu görülmektedir.

Reolojik Özellikler ve Hamur Teknolojisi

Adlay unu, yüksek protein içeriği ve kendine özgü nişasta yapısı sayesinde glutensiz gıda formülasyonlarında teknolojik işlevselliği yüksek bir hammadde olarak öne çıkmaktadır (Zhu, 2017). Bitkinin doğal olarak gluten içermemesi, çölyak hastaları için geliştirilen ürünlerde yapısal bütünlüğün sağlanabilmesi adına unun su bağlama kapasitesi, pişme özellikleri ve reolojik davranışlarının ayrıntılı biçimde incelenmesini zorunlu kılmaktadır (Comino ve ark., 2013; Herawati ve ark., 2020).

Su Bağlama Kapasitesi: Adlay ununun su ile etkileşimi, bünyesindeki protein ve nişasta granüllerinin yüzey morfolojisi tarafından belirlenmekte; ultra ince öğütme gibi mekanik işlemlerle su tutma kapasitesi önemli ölçüde artırılabilir (Zeng ve ark., 2022; Gao ve ark., 2020). Su çözünürlük indeksi çözünabilir bileşenlerin serbest kalma oranını yansıtmakta olup laktik asit bakterileriyle yürütülen fermentasyon süreçlerinin protein ve nişasta yapılarını kısmen parçalayarak bu değeri artırdığı saptanmıştır (Kristanti & Ratnawati, 2022).

Pişme Özellikleri: Rapid Visco Analyser (RVA) analizleri, adlay nişastasının mısır ve patates nişastasına kıyasla daha düşük bir kıvam alma sıcaklığına sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Zhu, 2017). Adlay ununun RVA profili; yüksek tepe ve parçalanma

viskozitesi ile düşük geri dönüş ve son viskozite ile karakterizedir (Chaisiricharoenkul ve ark., 2011). Düşük geri dönüş viskozitesi retrogradasyon eğiliminin zayıf olduğuna işaret etmekte ve adlay ununu dondurulmuş ürünler ile jöle benzeri formülasyonlar için uygun kılmaktadır (Chen ve ark., 2019). Bununla birlikte çimlendirme işlemi α -amilaz etkinliğini tetikleyerek nişasta granüllerini parçalamakta ve RVA viskozite değerlerinde belirgin düşüşe yol açmaktadır (Xu ve ark., 2018).

Hamur Reolojisi ve Hidrokolloid Etkileşimi: Glutensiz sistemlerde adlay unu, viskoelastik ağ oluşturacak gluten proteininden yoksun olduğundan hamur gelişimi zayıftır; bu eksikliği gidermek amacıyla ksantan gam ve guar gam gibi hidrokolloidlerin kullanımı yaygın bir teknolojik yaklaşım olarak benimsenmiştir (Kutschera & Krasaekoopt, 2012). Hidrokolloidler suyun viskozitesini artırarak psödoplastik akış davranışı sergilemekte; guar gamın adlay nişastasıyla hidrojen bağları kurarak viskoelastik modülü güçlendirdiği ve hamurun gaz tutma kapasitesini iyileştirdiği belirlenmiştir (Chen ve ark., 2019). Erişte üretiminde %75 adlay unu ve %25 tapyoka/hidrokolloid karışımlarının yüksek pişme kalitesi ve elastik tekstür sağladığı bildirilmiştir (Herawati ve ark., 2020).

Ekstrüzyon ve Fırıncılık Teknolojilerinde Akışkanlık: Ekstrüzyon koşullarında uygulanan mekanik kayma kuvvetleri adlay nişastasının kristal yapısını bozarak daha çözünür bir yapı oluşturmakta; bu davranış düşük nemli ve yüksek sıcaklıklı koşullarda nişastanın jelatinizasyon hızıyla doğrudan ilişkilidir (Zhang ve ark., 2021). Fırıncılık ürünlerinde (kek, bisküvi) ise adlay ununun düşük retrogradasyon eğilimi, ürünlerin raf ömrü boyunca yumuşak kalmasını sağlamaktadır (Iwansyah ve ark., 2022).

Adlayın Geleneksel ve Modern Gıdalarda Kullanımı

Adlay tohumları geleneksel olarak çorba, yulaf lapası, et suyu, atıştırmalık, çay, kahve ikamesi, bira, şarap ve sirke gibi çok çeşitli gıda formlarında kullanılmıştır. Modern gıda teknolojisi uygulamalarında ise adlay unu; bisküvi, kurabiye, pasta, ekmek ve glutensiz erişte üretiminde fonksiyonel bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Küresel ölçekte adlay tahılından fırıncılık ürünlerinden fermente içeceklere kadar geniş bir yelpazede yararlanılırken (Tablo 6), Türkiye gıda endüstrisi ve tarımsal literatüründe bu bitki henüz yeterince tanınmamaktadır. Yalnızca sert kabuklu yabancı formu (*Coix lacryma-jobi* var. *lacryma-jobi*) yerel ölçekte kolye, tespih ve benzeri süs eşyalarının yapımında kullanılmakta; besinsel ve endüstriyel potansiyeli ise ulusal ölçekte gıda amacıyla henüz değerlendirilmemiştir.

Tablo 6. Adlay tohumlarının geleneksel ve modern gıda kullanım alanları

Ürün / Tüketim Şekli	Açıklama	Kaynak
Çorba, yulaf lapası, et suyu	Geleneksel mutfaklarda temel veya tamamlayıcı gıda bileşeni olarak kullanılmaktadır.	Igbokwe ve ark., 2022
Pirinç ikamesi	Kurutulup kavrulduktan sonra pişirilerek pirinç yerine tüketilebilmektedir.	Soni ve ark., 2023
Atıştırmalık	Çiğ hâlde tatlı bir atıştırmalık olarak veya yer fıstığına benzer şekilde tüketilmektedir.	Soni ve ark., 2023
Çay	Toz hâline getirilerek geleneksel çay benzeri içecek üretiminde kullanılmaktadır.	Lim, 2012
Kahve ikamesi	Kavrulmuş ve öğütülmüş formda kafeinsiz kahve alternatifi olarak değerlendirilmektedir.	Lim, 2012
Bira	Fermente edilerek geleneksel alkollü içecek üretiminde kullanılmaktadır.	Lim, 2012
Şarap ve sirke	Fermentasyon yoluyla alkollü ve asidik içeceklerin üretiminde hammadde olarak yer almaktadır.	Weng ve ark., 2022
Un formu	Öğütülerek buğday unu ile karıştırılmakta veya tek başına kullanılabilir.	Andriana ve ark., 2021
Fırın ürünleri	Bisküvi, kurabiye, pasta ve ekmek üretiminde fonksiyonel hammadde olarak kullanılmaktadır.	Herawati ve ark., 2020
Glütensiz ürünler	Glütensiz erişte (noodle) gibi ürünlerin üretiminde temel bileşen olarak değerlendirilmektedir.	Iwansyah ve ark., 2022

Adlay İşleme Teknolojileri ve Endüstriyel Uygulamalar

Adlay, sert dokusu ve yoğun dış katmanları nedeniyle doğrudan tüketime uygun olmayan, bu engelleri aşmak için çeşitli termal ve teknolojik işlemlere (kavurma, ekstrüzyon, otoklav, basınçlı pişirme) ihtiyaç duyan bir tahıldır (Igbokwe ve ark., 2022). Bu işlemler, bitkinin besinsel biyoyararlanımını artırırken; nişasta kristalinitesi, protein yapıları ve ısıya duyarlı biyoaktif metabolitler üzerinde derin dönüşümlere yol açmaktadır (Zeng ve ark., 2022; Zhu, 2017). Adlay üzerine yürütülen bilimsel çalışmalar, besinsel kompozisyonundan işleme teknolojilerine, biyoaktif bileşenlerden gıda güvenliğine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır (Tablo 7).

Tablo 7. Adlay üzerine yapılan bazı çalışmalar

Kategori	Çalışma Alanı	Temel Bulgular ve Çıkarımlar	Kaynak
Besin Kompozisyonu	Makro ve mikro besin öğeleri	Adlay, %14–20 protein ile pirinç, buğday ve mısırdan daha yüksek protein içeriğine sahiptir. Ayrıca zengin mineral (Ca, P, Fe, Zn) ve vitamin (E, B grubu) profili sunar.	Zeng ve ark., 2022; Zhu, 2017
Modern ve Yenilikçi İşleme Teknolojileri	Yapısal sınırlılıklar	Sert ve yoğun tohum yapısı, uzun pişirme süresi ve düşük su absorpsiyonu gibi teknolojik dezavantajlara yol açmaktadır.	Ding ve ark., 2022; Zhu, 2017
	Yüksek Hidrostatik Basınç (HHP)	300–600 MPa basınç uygulamaları hidrasyon oranını artırmakta ve pişirme süresini kısaltmaktadır; nişastanın kısmi jelatinizasyonu ile daha yumuşak doku elde edilmektedir.	Ding ve ark., 2022
	Ultra ince öğütme	Partikül boyutunun mikron seviyesine indirilmesiyle çözünürlük ve su tutma kapasitesi iyileşmektedir.	Zhang ve ark., 2021
Gıda Ürünleri ve Formülasyon	Glütensiz erişte	%75 adlay unu + %25 manyok unu ve %1 hidrokolloid ilavesiyle elastik glütensiz erişteler üretilebilmektedir.	Herawati ve ark., 2020
	Fırıncılık ürünleri	Adlay ununun %30 oranında buğday unu ile karıştırılması optimal duyu kalite sağlamaktadır.	Shahrajabian ve ark., 2022
	Fonksiyonel kurabiyeler	Adlay ve moringa yaprağı unu ile üretilen kurabiyelerde protein içeriği artmakta (~%9,14) ve yaklaşık 95 günlük raf ömrü sağlanmaktadır.	Iwansyah ve ark., 2022

Biyoaktif Bileşenlerin Artırılması	Filizlendirme	60 saatlik filizlendirme sonucunda GABA içeriği 3,4 kat, coixol içeriği 3,6 kat artmakta; antioksidan kapasite yükselmektedir.	Xu ve ark., 2018
Gıda Güvenliği ve Kalite	Mikotoksin riski	Ticari adlay örneklerinde zearalenon ve aflatoksin B1 seviyelerinin yasal sınırları aşabildiği bildirilmektedir.	Igbokwe ve ark., 2022
	Besinsel yoğunluk ve stabilite	Adlayın pirinçten yaklaşık iki kat daha fazla protein (%14–20) içermesi nedeniyle oksidatif stabilite çalışmaları kalite kontrol açısından önem taşımaktadır.	Zhu, 2017

Termal İşlemlerin Biyokimyasal ve Fizikokimyasal Etkileri

Nişasta Jelatinizasyon Kinetiği ve Yapısal Dönüşümler: Adlay nişastası, yüksek oranda dirençli nişasta ve yavaş sindirilebilir nişasta fraksiyonları içermesiyle bilinmektedir (Chen ve ark., 2019). Diferansiyel Taramalı Kalorimetre analizleri, adlay nişastasının jelatinizasyonunun başlangıç, tepe ve bitiş sıcaklıkları ile entalpi değişimi üzerinden tanımlandığını göstermektedir (Zhu, 2017). Ekstrüzyon ve otoklav gibi ısıt işlemler, nişasta granüllerindeki amilopektin dallarını ve kristal yapıyı bozarak entalpi değerinde belirgin düşüşe neden olmaktadır (Zhang ve ark., 2021). Yüksek hidrostatik basınç ve eş zamanlı ısıt uygulamalar ise adlay tohumlarının mikroyapısında mikro ölçekli çatlaklar oluşturarak suyun endosperme penetrasyon hızını artırmakta, ancak dirençli nişasta fraksiyonunun bir kısmının kaybına yol açabilmektedir (Ding ve ark., 2022; Zeng ve ark., 2022).

Protein Denatürasyonu ve Maillard Reaksiyonu: Adlayın ana depolama proteini olan coixin ısıt işlemlere karşı hassastır (Ottoboni ve ark., 1990). Termal enerji, proteinlerin sekonder ve tersiyer yapılarındaki hidrojen bağlarını ve hidrofobik etkileşimleri bozarak denatürasyona neden olmakta; protein yapısının gevşemesi sindirim enzimlerinin nişasta granüllerine erişimini kolaylaştırmaktadır (Igbokwe ve ark., 2022; Zeng ve ark., 2022). Kavurma ve yüksek

sıcaklıkta ekstrüzyon gibi işlemler Maillard reaksiyonunu tetikleyerek oluşan melanoidinler ve aroma bileşikleri aracılığıyla duyu kaliteyi ve antioksidan kapasiteyi artırabilmekte; ancak aşırı ısı maruziyet esansiyel amino asitlerin, özellikle lizinin, biyoyararlanımını olumsuz etkileyebilmektedir (Zhu, 2017).

Isıya Duyarlı Biyoaktif Bileşenlerin Degradasyonu: Coixol belirli bir ısı stabilite gösterse de yüksek sıcaklıkta uzun süreli otoklav veya kavurma işlemleri degradasyon kinetiğini hızlandırmaktadır (Li ve ark., 2024); kontrollü çimlendirme ve ardından uygulanan düşük sıcaklıklı ısı işlemlerin bağlı formdaki coixol miktarını 3,6 kat artırarak biyoyararlanımı maksimize ettiği bildirilmiştir (Xu ve ark., 2018). Adlayın en önemli antikanser ajanı olan coixenolide ise biyoaktif lipid yapısı nedeniyle oksidasyona ve termal degradasyona yatkındır (Igbokwe ve ark., 2022); bu nedenle izolasyonunda süperkritik akışkan ekstraksiyonu ön plana çıkmakta (Hu ve ark., 2007), nanoemülsiyon ve lipozom tabanlı taşıyıcı sistemler ise bileşenin ısı işlemlere karşı korunmasını sağlamaktadır (Chang ve ark., 2020; Zeng ve ark., 2022).

Lipit Oksidasyonu ve Raf Ömrü Stabilitesi

Adlay, tahıllar arasında istisnai düzeyde yüksek lipit içeriğine (%5–10) sahip olmasıyla ayrılmaktadır (Wu ve ark., 2007). Bu fraksiyonun %83'ünden fazlasını oleik ve linoleik asit gibi doymamış yağ asitlerinin oluşturması bitkiye yüksek besinsel değer kazandırırken unun depolama sürecinde oksidatif ve hidrolitik bozulmalara karşı hassasiyetini de artırmaktadır (Bhandari ve ark., 2012; He ve ark., 2020).

Lipit Oksidasyonunun Mekanizması: Adlay ununun depolanması sırasında meydana gelen lipit oksidasyonu iki ana mekanizma üzerinden ilerlemektedir: hidrolitik ransidite (lipaz enzimleriyle trigliseritlerin hidrolizi sonucu serbest yağ asitlerinin birikmesi) ve oksidatif ransidite (çoklu doymamış yağ asitlerinin serbest radikal

mekanizmasıyla hidroperoksitlere, ardından aldehit ve ketonlara dönüşmesi) (Zhu, 2017).

Stabilizasyon Yöntemleri: Adlay ununun teknofonksiyonel özelliklerini korumak ve lipit stabilitesini sağlamak amacıyla termal stabilizasyon (kavurma, ekstrüzyon, otoklav ile lipaz ve lipoksijenaz inaktivasyonu), hidrotermal işlemler ve çimlendirme (tokoferol ve coixol gibi antioksidanların artırılması), yüksek hidrostatik basınç (300–600 MPa ile enzim aktivitesinin minimize edilmesi) ve inovatif taşıyıcı sistemler (nanoemülsiyon, lipozom, nanokafes yapıları) gibi çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır (Ding ve ark., 2022; Zheng ve ark., 2021).

İleri Gıda Teknolojileri

Mikro ve Nano Kapsülasyon Teknikleri: Adlay kepeği yağının nanoemülsiyon formülasyonları biyoaktiflerin bağırsak epitelinden geçişini ve biyoerişilebilirliğini iyileştirirken (Chang ve ark., 2020), lipozomal taşıyıcılar mide asiditesine karşı koruma sağlayarak biyoaktiflerin hedef bölgelere bozulmadan ulaşmasına olanak tanımaktadır (Bai ve ark., 2019). Gliadin-karboksimetil kitosan tabanlı nanokafes çerçeveleri ise adlay yağını hapsederek oksidatif strese karşı üstün koruma sağlamaktadır (Zheng ve ark., 2021).

Fermentasyon Teknolojisi: *Lactobacillus plantarum* ile yürütülen fermentasyon serbest fenolik bileşik profilini geliştirerek antioksidan kapasitesini artırırken (Yin ve ark., 2019), *Bacillus subtilis* fermentasyonu trombolitik aktiviteye sahip fibrinolitik enzimlerin ve tetrametilpirazinin sentezini tetiklemektedir (Wen ve ark., 2020). Fermentasyon ayrıca fitat gibi antinütrisyonel faktörleri azaltarak minerallerin biyoerişilebilirliğini artırmakta (Rodríguez ve ark., 2020) ve adlay polisakkaritlerinin yapısını modifiye ederek kısa zincirli yağ asidi üretimini teşvik etmektedir (Xia ve ark., 2021).

Adlayın Biyoyararlanımı ve Beslenme Etkileri

Adlay tahılının fonksiyonel gıda bileşeni olarak değerlendirilmesinde, içerdği biyoaktif moleküllerin (coixol, coixenolide, coixan polisakkaritleri, fenolik asitler ve flavonoidler) gıda içindeki stabilitesi, sindirim sistemi koşullarındaki dönüşümleri ve hedef dokulara ulaşmadaki etkinliği belirleyici rol oynamaktadır.

Sindirim Sistemi: Lipofilik karakterdeki coixenolide ve yağ asitleri mide ve ince bağırsakta misel oluşumu yoluyla emilirken, suda çözünen polisakkaritler ve fenolik bileşiklerin emilimi bağlı formlarına bağlıdır (Zhu, 2017). İşlenmemiş veya kaba öğütülmüş adlayda biyoaktiflerin önemli bir kısmı hücre duvarı polisakkaritlerine bağlı halde bulunduğundan biyoerişilebilirlik düşmekte; ultra ince öğütme, ekstrüzyon veya fermentasyon gibi işlemler bu bağlı formları serbestleştirerek salınım oranını artırmaktadır (Apirattananusorn ve ark., 2008; Zhang ve ark., 2021; Yin ve ark., 2019).

Düşük Glisemik İndeks ve Metabolik Sağlık: Adlayın glisemik indeks değeri 35–55 arasında olup kahverengi pirinç (Gİ: 82) ve beyaz ekmekten (Gİ: 100) belirgin şekilde düşük, glisemik yük değeri ise 9'dur (Lin ve ark., 2010; Zhu, 2017). Bu düşük glisemik yanıtın başlıca nedenleri; yüksek dirençli nişasta ve yavaş sindirilebilir nişasta fraksiyonları (%5,5–18), protein ve lipitin nişasta sindirilebilirliğini geciktirici etkisi ile çözünür diyet lifi ve polisakkaritlerin viskozite artırıcı etkisidir (Chen ve ark., 2019; Huda ve ark., 2023; Mayasti ve ark., 2021). Öğütme derecesi glisemik yanıtı doğrudan etkilemekte olup parlatılmış adlay için Gİ 20,1, aleuron tabakası için 47,5 ve tam tahıl için 60,3 olarak kaydedilmiştir (Tensiska ve ark., 2017).

Prebiyotik Potansiyel ve Bağırsak Mikrobiyotası: Adlay polisakkaritleri ve fruktooligosakkarit içeriği bitkiyi prebiyotik etki potansiyeli yüksek bir gıda maddesi haline getirmektedir. *In vitro* fermentasyon çalışmaları, adlay lif fraksiyonlarının insan fekal mikrobiyotası tarafından fermente edildiğinde asetat, propiyonat ve

bütirat gibi kısa zincirli yağ asidi üretimini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymuştur (Huda ve ark., 2023; Xia ve ark., 2021). Hayvan modellerinde ise adlay polisakkaritlerinin *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* gibi yararlı bakteri popülasyonlarını seçici olarak artırırken potansiyel patojen grupların göreceli bolluğunu azalttığı gösterilmiştir (Liu ve ark., 2019).

Antioksidan Kapasite ve Fenolik Bileşiklerin Biyoyararlanımı:

Adlayın toplam fenolik içeriği ve antioksidan kapasitesi kabuk rengine ve işleme yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Tam tahıl siyah adlay ununun toplam fenolik içeriği 7,93 mg GAE/g ve DPPH radikal süpürme aktivitesi %6,49 iken, beyaz adlay ununda bu değerler sırasıyla 7,33 mg GAE/g ve %5,40'tır (Choi ve ark., 2007). Adlayda başlıca fenolik bileşikler p-kumarik asit, vanilik asit, klorojenik asit, tannik asit, kateşol ve ferulik asittir (Huang ve ark., 2009). Ferulik asit gibi fenoliklerin büyük bölümü hücre duvarına ester bağlarıyla bağlı olduğundan serbest kalabilmesi için kolon mikrobiyotasının esteraz aktivitesine ihtiyaç duyulmaktadır (Wang ve ark., 2016).

SONUÇ

Adlay (*Coix lacryma-jobi* L.), sahip olduğu besinsel bileşim, teknofonksiyonel özellikler ve işleme teknolojilerine uyum kapasitesiyle fonksiyonel gıda ve alternatif tahıl araştırmalarında dikkat çeken türlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Yüksek protein içeriği, dengeli amino asit profili, diyet lifi, biyoaktif bileşenleri ve glutensiz yapısının yanı sıra düşük glisemik indeks özelliği ve prebiyotik potansiyeli taşıyan polisakkarit içeriği, adlayı özel beslenme gereksinimlerine yönelik ürünlerde ve fonksiyonel gıda formülasyonlarında kullanılabilecek önemli bir hammadde konumuna taşımaktadır.

Teknolojik açıdan adlay; un, nişasta, içecek, erişte, fırıncılık ve ekstrüde ürün formülasyonları için çeşitli avantajlar sunmakta;

yüksek su bağlama kapasitesi, düşük retrogradasyon eğilimi ve uygun viskozite özellikleri ürün kalitesinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ekstrüzyon, çimlendirme, fermentasyon, ultra ince öğütme ve yüksek hidrostatik basınç gibi modern işleme teknolojilerinin adlayın teknofonksiyonel özelliklerini ve biyoerişilebilirliğini iyileştirebildiği gösterilmiş; nanoemülsiyon ve lipozomal taşıyıcı sistemler ise biyoaktif bileşenlerin korunması ve fonksiyonel ürünlere entegrasyonu açısından umut verici yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte adlayın endüstriyel ölçekte yaygınlaşabilmesi için sert tane yapısına bağlı ek işleme gereksinimleri, yüksek lipid içeriğinden kaynaklanan oksidatif stabilite sorunları ve düşük üretim hacmi gibi sınırlılıkların aşılması gerekmektedir. Farklı adlay genotiplerinin teknolojik performansları, işleme parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkileri ve tüketici kabulüne ilişkin veriler de halen yetersiz kalmaktadır. Biyoaktif bileşenlerin gıda içindeki davranışları, işleme koşullarının biyoaktif stabilitesi üzerindeki etkileri, raf ömrü performansı ve endüstriyel ölçekli üretim süreçleri bu alandaki başlıca bilgi boşluklarını oluşturmaktadır; laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmaların endüstriyel uygulamalarla desteklenmesi adlayın ticari potansiyelinin ortaya konmasına katkı sağlayacaktır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde adlay, çeşitli bölgelerde sert kabuklu tohumlarıyla tesbih yapımında tanınan ancak besinsel ve gıda amaçlı kullanım potansiyeli büyük ölçüde göz ardı edilen bir bitki konumundadır. Artan glutensiz ürün talebi, alternatif tahıllara yönelik ilgi ve sürdürülebilir üretim sistemlerine duyulan ihtiyaç göz önüne alındığında, adlayın yalnızca geleneksel kullanım alanlarıyla değil; fonksiyonel gıda hammaddesi, alternatif tahıl kaynağı ve katma değerli ürün geliştirme platformu olarak da ele alınması önem taşımaktadır.

Sonuç olarak adlay, besinsel nitelikleri, teknolojik uygulanabilirliği ve fonksiyonel özellikleriyle hem geleneksel tahıllara alternatif oluşturabilecek hem de yenilikçi gıda sistemlerinde değerlendirilebilecek önemli bir potansiyele sahip stratejik bir tahıl türüdür.

KAYNAKÇA

- Andriana, Y., Fajriani, N. A., Iwansyah, A. C., & Xuan, T. D. (2023). Phytochemical constituents of Indonesian adlay (*Coix lacryma-jobi* L.) and their potential as antioxidants and crop protection agents. *Agrochemicals*, 2(1), 135–149. <https://doi.org/10.3390/agrochemicals2010010>
- Andriana, Y., Indriati, A., Mayasti, N. K. I., Iwansyah, A. C., Anggara, C. E. W., Litaay, C., & Triyono, A. (2021). Adlay (*Coix lacryma-jobi* L.), a potential source alternative to wheat flour: A financial feasibility analysis for small scale production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 672(1), Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/672/1/012032>
- Apirattananusorn, S., Tongta, S., Cui, S. W., & Wang, Q. (2008). Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable nonstarch polysaccharides from Job's tears. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(18), 8549–8557. <https://doi.org/10.1021/jf801231y>
- Bai, C., Zheng, J., Zhao, L., Chen, L., Xiong, H., & McClements, D. J. (2019). Development of oral delivery systems with enhanced antioxidant and anticancer activity: Coix seed oil and β -carotene coloaded liposomes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(2), 406–414. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04879>
- Bhandari, S. R., Park, S. K., Cho, Y. C., & Lee, Y. S. (2012). Evaluation of phytonutrients in adlay (*Coix lacryma-jobi* L.) seeds. *African Journal of Biotechnology*, 11(8), 1872–1878. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2416>
- Bon, S. G., Antesco, G. P., & Enicola, E. E. (2023). Morphological characteristics and variability of traditional starch forming coix (*Coix lacryma-jobi* var. *ma-yuen*) populations from Mindanao Island, Philippines. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 24(8), 4415–4423. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240819>

- Chaisiricharoenkul, J., Tongta, S., & Intarapichet, K. O. (2011). Structure and chemical and physicochemical properties of Job's tear (*Coix lacryma-jobi* L.) kernels and flours. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 18(2), 109–122.
- Chang, W. C., Hu, Y. T., Huang, Q., Hsieh, S. C., & Ting, Y. (2020). Development of a topical applied functional food formulation: Adlay bran oil nanoemulgel. *LWT - Food Science and Technology*, 117, Article 108619. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108619>
- Chen, J., Chen, Y., Ge, H., Wu, C., Pang, J., & Miao, S. (2019). Multi-scale structure, pasting and digestibility of adlay (*Coix lacryma-jobi* L.) seed starch. *Food Hydrocolloids*, 89, 885–891. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.050>
- Choi, Y., Jeong, H. S., & Lee, J. (2007). Antioxidant activity of methanolic extracts from some grains consumed in Korea. *Food Chemistry*, 103(1), 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.004>
- Comino, I., de Lourdes Moreno, M., Real, A., Rodriguez-Herrera, A., Barro, F., & Sousa, C. (2013). The gluten-free diet: Testing alternative cereals tolerated by celiac patients. *Nutrients*, 5(10), 4250–4268. <https://doi.org/10.3390/nu5104250>
- Corke, H., Huang, Y., & Li, J. S. (2016). Coix: Overview. In C. Wrigley, H. Corke, & K. Seetharaman (Eds.), *Encyclopedia of food grains* (2nd ed., pp. 184–189). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00008-5>
- Ding, Y., Wang, M., Wang, J., Diao, J., Wu, Y., Cheng, J., & Ban, Q. (2022). Exploring the hydration promotion and cooking quality improvement of adlay seed by high hydrostatic pressure. *LWT - Food Science and Technology*, 171, Article 114158. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114158>
- Gao, W., Chen, F., Wang, X., & Meng, Q. (2020). Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science*

and *Food Safety*, 19(4), 2222–2255.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12580>

Guo, C., Wang, Y., Yang, A., He, J., Xiao, C., Lv, S., ... & Zhou, S. (2020). The Coix genome provides insights into Panicoideae evolution and papery hull domestication. *Molecular Plant*, 13(2), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2019.11.008>

He, C., Li, Z., Liu, H., Zhang, H., Wang, L., & Chen, H. (2020). Chemical compositions and antioxidant activity of adlay seed (*Coix lacryma-jobi* L.) oil extracted from four main producing areas in China. *Journal of Food Science*, 85(1), 123–131. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14982>

Herawati, H., Kamsiati, E., & Bachtiar, M. (2020). Modification of process and formulations technology to the characteristics of hanjeli gluten free noodles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 519(1), Article 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/519/1/012039>

Hu, A. J., Zhao, S., Liang, H., Qiu, T. Q., & Chen, G. (2007). Ultrasound assisted supercritical fluid extraction of oil and coixenolide from adlay seed. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(2), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.03.005>

Huang, D. W., Kuo, Y. H., Lin, F. Y., Lin, Y. L., & Chiang, W. (2009). Effect of adlay (*Coix lacryma-jobi* L. var. *ma-yuen* Stapf) testa and its phenolic components on Cu²⁺-treated low-density lipoprotein (LDL) oxidation and lipopolysaccharide (LPS)-induced inflammation in RAW 264.7 macrophages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(6), 2259–2266. <https://doi.org/10.1021/jf803255p>

Huang, Y. J., Chang, C. C., Wang, Y. Y., Chiang, W. C., Shih, Y. H., Shieh, T. M., Wang, K. L., Ali, M., & Hsia, S. M. (2021). Adlay testa (*Coix lacryma-jobi* L. var. *ma-yuen* Stapf.) ethanolic extract and its active components exert anti-proliferative effects on endometrial cancer cells via cell cycle arrest.

- Huda, M. N., Li, X., Jahan, T., He, Y., Guan, C., Zhang, K., ... & Zhou, M. (2023). Acceleration of the genetic gain for nutraceutical improvement of adlay (*Coix L.*) through genomic approaches: Current status and future prospects. *Food Reviews International*, 39(8), 5377–5401.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2067175>
- Igbokwe, C. J., Wei, M., Feng, Y., Duan, Y., Ma, H., & Zhang, H. (2022). Coix seed: A review of its physicochemical composition, bioactivity, processing, application, functionality, and safety aspects. *Food Reviews International*, 38(sup1), 921–939.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1892129>
- Iwansyah, A. C., Melanie, D., Cahyadi, W., Indraningsih, A. W., Khasanah, Y., Indriati, A., ... & Yahya, I. H. (2022). Shelf life evaluation of formulated cookies from Hanjeli (*Coix lacryma-jobi L.*) and Moringa leaf flour (*Moringa oleifera*). *Food Bioscience*, 47Trace, Article 101787.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101787>
- Jiang, H. E., Wang, B., Li, X., Lu, E. G., & Li, C. S. (2008). A consideration of the involucre remains of *Coix lacryma-jobi L.* (Poaceae) in the Sampula Cemetery (2000 years BP), Xinjiang, China. *Journal of Archaeological Science*, 35(5), 1311–1316. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.09.006>
- Kang, S. H., Kim, B., Choi, B. S., Lee, H. O., Kim, N. H., Lee, S. J., & Kim, C. K. (2020). Genome assembly and annotation of soft-shelled adlay (*Coix lacryma-jobi* variety *ma-yuen*), a cereal and medicinal crop in the Poaceae family. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 630.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.0630>
- Kristanti, D., & Ratnawati, L. (2022). Physicochemical and functional properties of fermented adlay (*Coix lacryma-jobi L.*) flour. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

- Kutschera, M., & Krasaekoopt, W. (2012). The use of Job's tear (*Coix lacryma-jobi* L.) flour to substitute cake flour in butter cake. *AU Journal of Technology*, 15(4), 233–238.
- Li, H., Peng, L., Yin, F., Fang, J., Cai, L., Zhang, C., ... & Liang, Z. (2024). Research on Coix seed as a food and medicinal resource, its chemical components and their pharmacological activities: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 319, Article 117309. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.117309>
- Lim, T. K. (2012). *Coix lacryma-jobi*. In *Edible medicinal and non-medicinal plants: Volume 5, fruits* (pp. 243–261). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3_14
- Lin, M. H. A., Wu, M. C., Lu, S., & Lin, J. (2010). Glycemic index, glycemic load and insulinemic index of Chinese starchy foods. *World Journal of Gastroenterology*, 16(39), 4973–4979. <https://doi.org/10.3748/wjg.v16.i39.4973>
- Liu, S., Li, F., & Zhang, X. (2019). Structural modulation of gut microbiota reveals Coix seed contributes to weight loss in mice. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(13), 5311–5321. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09786-z>
- Liu, X., Rong, Y. Z., Zhang, X., Mao, D. Z., Yang, Y. J., & Wang, Z. W. (2015). Rapid determination of total dietary fiber and minerals in Coix seed by near-infrared spectroscopy technology based on variable selection methods. *Food Analytical Methods* 8(7), 1607–1617. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-0037-y>
- Mayasti, N. K. I., Andriana, Y., & Iwansyah, A. C. (2021). Glycemic index of adlay (*Coix lacryma-jobi* L.) based products: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1), Article 012135. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012135>

- Ottoboni, L. M. M., Leite, A., Targon, M. L. N., Crozier, A., & Arruda, P. (1990). Characterization of the storage protein in seed of *Coix lacryma-jobi* var. *adlay*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 38(3), 631–635. <https://doi.org/10.1021/jf00093a010>
- Piironen, V., Toivo, J., & Lampi, A. M. (2002). Plant sterols in cereals and cereal products. *Cereal Chemistry*, 79(1), 148–154. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.1.148>
- Rodríguez, J. P., Rahman, H., Thushar, S., & Singh, R. K. (2020). Healthy and resilient cereals and pseudo-cereals for marginal agriculture: Molecular advances for improving nutrient bioavailability. *Frontiers in Genetics*, 11, Article 49. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00049>
- Shahrajabian, M. H., Sun, W., Cheng, Q., & Khoshkharam, M. (2022). Exploring the quality of foods from ancient China based on traditional Chinese medicine. In *Functional foods and nutraceuticals in metabolic and non-communicable diseases* (pp. 87–105). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819815-5.00048-3>
- Soni, J. K., Lalramhlimi, B., Kumar, A., Navik, O., Lungmuana, Sailo, L., & Doley, S. (2023). Coix: An underutilized functional food crop of Mizoram. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 70(7), 2143–2159. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01587-8>
- Tensiska, I. S. S., Suprijana, O., Qosim, W. A., & Less, Y. C. (2017). Glycemic and satiety index of some degree of milling of Indonesian adlay (*Coix lacryma-jobi* var. *ma-yuen*) indigenous genotype. *International Journal of Scientific Research*, 6(10), 2029–2034. <https://doi.org/10.21275/ART201775722029>
- Wang, L., Chen, C., Su, A., Zhang, Y., Yuan, J., & Ju, X. (2016). Structural characterization of phenolic compounds and antioxidant activity of the phenolic-rich fraction from defatted adlay (*Coix lacryma-jobi* L. var. *ma-yuen* Stapf) seed meal.

- Wen, A., Xie, C., Mazhar, M., Wang, C., Zeng, H., Qin, L., & Zhu, Y. (2020). Tetramethylpyrazine from adlay (*Coix lacryma-jobi*) biotransformation by *Bacillus subtilis* and its quality characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 57(11), 4092–4102. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04443-0>
- Weng, W. F., Peng, Y., Pan, X., Yan, J., Li, X. D., Liao, Z. Y., ... & Zhou, M. L. (2022). Adlay, an ancient functional plant with nutritional quality, improves human health. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 1019375. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1019375>
- Wu, T. T., Charles, A. L., & Huang, T. C. (2007). Determination of the contents of the main biochemical compounds of adlay (*Coix lacryma-jobi*). *Food Chemistry*, 104(4), 1509–1515. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.02.027>
- Xi, X. J., Zhu, Y. G., Tong, Y. P., Yang, X. L., Tang, N. N., Ma, S. M., & Cheng, Z. (2016). Assessment of the genetic diversity of different Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) accessions and the active composition and anticancer effect of its seed oil. *PLOS ONE*, 11(4), Article e0153269. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153269>
- Xia, T., Liu, C. S., Hu, Y. N., Luo, Z. Y., Chen, F. L., Yuan, L. X., & Tan, X. M. (2021). Coix seed polysaccharides alleviate type 2 diabetes mellitus via gut microbiota-derived short-chain fatty acids activation of IGF1/PI3K/AKT signaling. *Food Research International*, 150, Article 110717. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110717>
- Xu, L., Yang, N., Wu, F., Jin, Z., & Xu, X. (2018). Impact of germination on the chemical components and bioactive properties of adlay (*Coix lacryma-jobi* L.) water extract. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(2), 449–456. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13603>

- Yin, H. M., Zhong, Y. D., Xia, S. K., Hu, J. L., Nie, S. P., Xiong, T., & Xie, M. Y. (2019). Effects of fermentation with *Lactobacillus plantarum* NCU137 on nutritional, sensory and stability properties of Coix (*Coix lacryma-jobi* L.) seed. *Food Chemistry*, 297, Article 126037. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126037>
- Zeng, Y., Yang, J., Chen, J., Pu, X., Li, X., Yang, X., ... & He, J. (2022). Actional mechanisms of active ingredients in functional food adlay for human health. *Molecules*, 27(15), Article 4808. <https://doi.org/10.3390/molecules27154808>
- Zhang, T., Xiao, S. Y., Ding, Z. H., & Song, Y. T. (2021). Effects of superfine grinding on physicochemical properties and morphological structure of coix seed powders. *Journal of Cereal Science*, 102, Article 103361. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103361>
- Zheng, W., Chen, Z. P., Yang, Y. H., Yang, R., Yang, T. D., Lai, P. L., & Liao, L. (2021). Improved stabilization of coix seed oil in a nanocage-coating framework based on gliadin-carboxymethyl chitosan-Ca²⁺. *Carbohydrate Polymers*, 257, Article 117557. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117557>
- Zhu, F. (2017). Coix: Chemical composition and health effects. *Trends in Food Science & Technology*, 61Trace, 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.003>

