

GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ



ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026



EDİTÖR

Prof. Dr. Arzu KAVAZ YÜKSEL

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-300-8

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Arzu KAVAZ YÜKSEL

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

GIDA ENDÜSTRİSİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: YAPAY ZEKÂ TEKNOLOJİLERİ VE GÜNCEL UYGULAMALAR

Hilal MERAL 7

BÖLÜM 2

GIDA TEKNOLOJİSİNDE İNCE TABAKA KURUTMA TEMELLER, MODELLEME, DEĞERLENDİRME VE TASARIM

Aydın KILIÇ 28

BÖLÜM 3

GIDA BİYOTEKNOLOJİSİNDE POSTBİYOTİKLER: ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ, BİYOLOJİK AKTİVİTELERİ VE GIDA UYGULAMALARI

Özgül YAZAR 43

BÖLÜM 4

DOĞAL GIDA PİGMENTLERİ: RENK, STABİLİTE VE UYGULAMA

Zeynep Görkem DURANTAŞ 60

BÖLÜM 1

GIDA ENDÜSTRİSİNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM: YAPAY ZEKÂ TEKNOLOJİLERİ VE GÜNCEL UYGULAMALAR

Hilal MERAL¹

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Tokat/
Türkiye hilal.meral@gop.edu.tr ORCID: 0000-0001-6238-7958

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisi, artan dünya nüfusu, değişen tüketici talepleri, sınırlı doğal kaynaklar ve sürdürülebilir üretim gereklilikleri doğrultusunda önemli bir teknolojik dönüşüm sürecinden geçmektedir. Küresel gıda talebindeki artış, üretim kapasitesinin geliştirilmesini ve mevcut kaynakların daha etkin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte, iklim değişikliği, su ve enerji kaynakları üzerindeki baskılar, gıda kayıpları ve tedarik zincirindeki aksaklıklar, gıda sistemlerinin sürdürülebilirliğini etkileyen başlıca sorunlar arasında yer almaktadır. Küresel gıda güvencesinin sağlanması, üretim verimliliğinin artırılmasını ve gıda üretiminde karşılaşılan sorunlara yönelik yenilikçi teknolojilerin mevcut üretim yaklaşımlarına entegre edilmesini gerekli kılmaktadır (Gbashi ve Njobeh, 2024).

Gıda endüstrisinde kalite, güvenlik ve sürdürülebilirliğin sağlanması, üretim süreçlerinin etkin biçimde izlenmesine ve kontrol edilmesine bağlıdır. Gıda hammaddelerinin fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerindeki değişkenlik, işleme koşullarının optimizasyonunu güçleştirmektedir. Ayrıca üretim aşamalarında ortaya çıkan farklı nitelikteki verilerin değerlendirilmesi, uygun analitik yöntemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Geleneksel kontrol yöntemleri belirli parametrelerin ölçülmesinde güvenilir sonuçlar sağlamakla birlikte, karmaşık değişken ilişkilerinin modellenmesinde ve gerçek zamanlı karar verme süreçlerinde çeşitli sınırlılıklara sahiptir. Bu kapsamda, veriye dayalı analiz yöntemlerinin gıda üretim sistemlerine entegrasyonu giderek önem kazanmaktadır (Yang ve ark., 2025).

Yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), öğrenme, örüntü tanıma, sınıflandırma, tahmin ve karar verme gibi bilişsel işlevlerin bilgisayar sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmesini sağlayan yöntemleri kapsamaktadır. Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme alanlarındaki gelişmeler, büyük veri kümelerinin analiz edilmesine ve karmaşık süreçlerin modellenmesine yönelik yeni olanaklar sunmaktadır. Gıda endüstrisinde kullanılan AI uygulamaları; üretim parametrelerinin optimizasyonu, kalite özelliklerinin tahmini, ürünlerin sınıflandırılması, mikrobiyolojik risklerin değerlendirilmesi ve raf ömrünün belirlenmesi gibi farklı alanlarda yoğunlaşmaktadır. AI teknolojileri; gıda işleme, kalite kontrolü, ürün geliştirme ve tedarik zinciri yönetimi gibi farklı alanlarda veri temelli karar verme süreçlerini destekleyerek endüstriyel uygulamaların daha verimli ve etkin hale getirilmesine katkı sağlamaktadır (Zatsu ve ark., 2024).

Gıda endüstrisinde AI uygulamalarının gelişiminde görüntü işleme sistemleri, akıllı sensörler ve otomasyon teknolojileri önemli rol oynamaktadır. Bu teknolojiler aracılığıyla

üretim sürecinden elde edilen verilerin analiz edilmesi, ürün özelliklerinin hızlı biçimde değerlendirilmesini ve proses koşullarındaki değişimlerin izlenmesini mümkün kılmaktadır. Bilgisayarlı görüntü işleme ve AI teknolojileri, gıda endüstrisinde ürün sınıflandırma, kalite değerlendirmesi ve otomatik kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta; ürünlerin renk, şekil, boyut ve yüzey kusurları gibi özelliklerinin nesnel biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu uygulamalar, kalite kontrol süreçlerinin standardizasyonuna ve üretim hatlarında insan kaynaklı değerlendirme farklılıklarının azaltılmasına katkı sunmaktadır (Kakani ve ark., 2020).

Yapay zekâ teknolojilerinin gıda endüstrisindeki gelişimi, Endüstri 4.0 kapsamında değerlendirilen dijitalleşme ve otomasyon uygulamalarıyla yakından ilişkilidir. Endüstri 4.0 yaklaşımı; nesnelerin interneti, büyük veri analitiği, akıllı sensörler, robotik sistemler ve siber-fiziksel teknolojilerin üretim ortamlarına entegrasyonunu temel almaktadır. Bu teknolojiler, gıda işleme süreçlerinde üretim verimliliğinin artırılması, kalite parametrelerinin izlenmesi ve kaynak kullanımının iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle sensör sistemlerinden elde edilen verilerin makine öğrenmesi algoritmalarıyla değerlendirilmesi, üretim süreçlerinin daha ayrıntılı biçimde modellenmesini ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesini sağlamaktadır (Hassoun ve ark., 2022).

Son yıllarda dijital ikiz teknolojileri, gelişmiş görüntüleme yöntemleri ve yapay zekâ destekli tahmin modelleri, gıda endüstrisindeki dijital dönüşümün önemli araştırma alanları arasında yer almaktadır. Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel bir üretim sisteminin dijital ortamda temsil edilmesine ve sistem davranışının farklı koşullar altında incelenmesine olanak tanımaktadır (Henrichs ve ark., 2022). Bununla birlikte, söz konusu teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği; veri kalitesi, altyapı gereksinimleri, yatırım maliyetleri ve model güvenilirliği gibi faktörlerden etkilenmektedir. Gıda endüstrisinde yapay zekâ uygulamalarının yaygınlaştırılmasında veri bütünlüğü, sistem entegrasyonu ve teknolojik altyapı sorunlarının dikkate alınması gerekmektedir (Yang ve ark., 2025).

Bu kitap bölümünde, gıda endüstrisinde kullanılan temel yapay zekâ yöntemleri ve bu yöntemlerin güncel uygulama alanları ele alınmaktadır. Gıda işleme süreçlerinin optimizasyonu, kalite kontrolü, gıda güvenliği, raf ömrü tahmini ve ürün geliştirme çalışmalarında yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı değerlendirilmektedir. Ayrıca Endüstri 4.0 kapsamında gelişen dijital teknolojiler, sürdürülebilir gıda üretimi açısından sağladıkları olanaklar ve uygulamada karşılaşılan sınırlılıklar çerçevesinde incelenmektedir.

2. YAPAY ZEKÂ TEKNOLOJİLERİ VE TEMEL YAKLAŞIMLAR

Yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), verilerden öğrenme, örüntüleri belirleme, tahmin oluşturma ve karar verme süreçlerinin bilgisayar sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmesini sağlayan yöntemleri kapsamaktadır. AI teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte karmaşık veri kümelerinin işlenmesi, değişkenler arasındaki ilişkilerin modellenmesi ve elde edilen sonuçların karar destek sistemlerinde kullanılması mümkün hâle gelmiştir. Gıda endüstrisinde bu teknolojiler; üretim parametrelerinin belirlenmesi, proses kontrolü, ürün kalitesinin değerlendirilmesi ve gıda güvenliği risklerinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. AI uygulamalarında uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi gibi farklı yöntemlerden yararlanılmakta; kullanılacak yaklaşımın seçimi ise veri yapısına, modellenen sürecin özelliklerine ve hedeflenen çıktılara bağlı olarak değişmektedir (Mavani ve ark., 2022).

2.1. Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme

Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML), bilgisayar sistemlerinin verilerden yararlanarak belirli örüntüleri öğrenmesini ve yeni veriler üzerinde tahmin veya sınıflandırma yapmasını sağlayan AI alt alanıdır. Geleneksel programlama yöntemlerinde karar verme işlemleri önceden tanımlanmış kurallara dayanırken, ML algoritmaları veriler arasındaki ilişkilerden yararlanarak modeller oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle çok sayıda değişkenin bulunduğu ve değişkenler arasındaki ilişkilerin doğrusal olmadığı gıda işleme süreçlerinde önem taşımaktadır (Janiesch ve ark., 2021).

Makine öğrenmesi yöntemleri genel olarak denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme olarak sınıflandırılmaktadır. Denetimli öğrenmede model, girdi değişkenleri ile bilinen çıktı değerleri arasındaki ilişkiler kullanılarak eğitilmektedir. Bu yöntem; nem içeriği, sıcaklık, işlem süresi, mikrobiyal yük ve kalite parametreleri gibi ölçülebilir özelliklerin tahmininde kullanılabilir. Denetimsiz öğrenmede ise önceden tanımlanmış çıktı değerleri bulunmamakta, veriler arasındaki benzerlikler ve farklılıklar incelenerek gruplandırma veya örüntü belirleme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Pekiştirmeli öğrenme, bir sistemin gerçekleştirdiği işlemler sonucunda aldığı geri bildirimlere göre karar stratejisini geliştirmesine dayanmaktadır. Gıda endüstrisinde proses kontrolü ve otomasyon uygulamalarında bu yaklaşımın kullanım potansiyeli bulunmaktadır (Chaurasia ve ark., 2025).

Gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ML algoritmaları arasında destek vektör makineleri (Support Vector Machines, SVM), rastgele orman (Random Forest, RF), karar

ağaçları ve yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks, ANN) yer almaktadır. Bu yöntemler fizikokimyasal özelliklerin tahmini, kalite sınıflandırması ve üretim verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmakta; algoritma seçimi veri kümesinin yapısı, modelin yorumlanabilirliği ve tahmin performansına göre yapılmaktadır (Mavani ve ark., 2022). ANN modelleri, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesine olanak sağladığından gıda proseslerinde geniş kullanım alanına sahiptir. Ekstraksiyon, kurutma, ekstrüzyon, filtrasyon, fermantasyon ve ısıtma işlem gibi süreçlerde proses koşulları ile ürün özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve uygun işlem koşullarının tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Bhagya Raj ve Dash, 2022).

Derin öğrenme (Deep Learning, DL), çok katmanlı sinir ağlarına dayanan ve özellikle görüntü, spektral veri ve diğer yüksek boyutlu veri kümelerinin analizinde kullanılan bir ML yaklaşımıdır. Evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks, CNN), görüntülerden renk, şekil, doku ve yüzey özelliklerini otomatik olarak öğrenebilmekte; gıda endüstrisinde meyve ve sebzelerin sınıflandırılması, yüzey kusurlarının belirlenmesi, tazelik değerlendirmesi ve otomatik kalite kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır (Han ve ark., 2022).

Gıda endüstrisinde kullanılacak AI yöntemi; veri yapısı, analiz amacı ve modellenen sürecin özelliklerine göre değişmektedir. ANN modelleri karmaşık ilişkilerin modellenmesinde, RF ve SVM sınıflandırma ve tahmin problemlerinde, CNN ise görüntü tabanlı kalite kontrol uygulamalarında öne çıkmaktadır. Belirsiz bilgilerin işlendiği karar süreçlerinde bulanık mantık, doğrusal olmayan ve karmaşık sistemlerin modellenmesinde ise ANN ile bulanık mantığı birleştiren ANFIS yaklaşımlarından yararlanılmaktadır (Lwele ve ark., 2025).

AI modellerinin performansı, kullanılan algoritmanın özelliklerinin yanı sıra veri kümesinin niteliğine ve modelin doğrulama yöntemine bağlıdır. Eğitim verilerinin yetersiz veya temsil gücünün düşük olması, modelin yeni örnekler üzerindeki tahmin başarısını sınırlandırabilmektedir. Ayrıca eğitim verilerine aşırı uyum sağlanması (overfitting), modelin eğitim aşamasında yüksek doğruluk göstermesine rağmen bağımsız veriler üzerinde daha düşük performans sergilemesine neden olabilmektedir. Bu nedenle gıda endüstrisinde geliştirilen modellerin uygun doğrulama yöntemleriyle değerlendirilmesi ve farklı üretim koşullarındaki güvenilirliğinin incelenmesi gerekmektedir (Han ve ark., 2022).

2.2. Bilgisayar Görüntüleme ve Akıllı Sensör Sistemleri

Bilgisayar görüntüleme (Computer Vision, CV), dijital görüntülerden elde edilen bilgilerin bilgisayar algoritmalarıyla analiz edilmesine dayanan ve gıda endüstrisinde ürünlerin

fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi ile kalite kontrol süreçlerinin otomatikleştirilmesinde kullanılan bir teknolojidir. Görüntü edinme, ön işleme, özellik çıkarımı ve sınıflandırma aşamalarından oluşan bu sistemlerde AI algoritmaları aracılığıyla ürün tanıma, ayıklama, sınıflandırma ve kalite değerlendirmesine yönelik kararlar oluşturulabilmektedir (Kakani ve ark., 2020).

Geleneksel görüntü işleme yöntemleri ürünlerin renk, şekil ve doku gibi önceden tanımlanan özelliklerine dayanırken, derin öğrenme modelleri bu özellikleri görüntülerden doğrudan öğrenebilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle doğal varyasyonun ve yüzey farklılıklarının yüksek olduğu meyve ve sebzelerde olgunluk düzeyinin belirlenmesi, yüzey kusurlarının tespiti ve kalite sınıflandırması gibi uygulamalarda avantaj sağlamaktadır. CNN tabanlı görüntü analizinin meyve tazeliğinin tahribatsız değerlendirilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir (Han ve ark., 2022).

Gıda kalite değerlendirmesinde kullanılan ileri görüntüleme tekniklerinden biri olan hiperspektral görüntüleme (Hyperspectral Imaging, HSI), ürünün uzamsal özellikleri ile farklı dalga boylarına ait spektral bilgileri birlikte değerlendirmektedir. Böylece yüzey görünümünün yanında uygun spektral bölgelerde kimyasal bileşim ve kalite özellikleriyle ilişkili verilere de ulaşılabilmektedir. HSI verilerinin makine öğrenmesi algoritmalarıyla birlikte kullanılması, gıda kalite kontrolünde önemli bir potansiyel sunmakla birlikte, yüksek boyutlu veri yapısı nedeniyle etkili ön işleme ve değişken seçimi yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Saha ve Manickavasagan, 2021).

Akıllı sensör sistemleri, gıda işleme ve depolama koşullarında sıcaklık, bağıl nem, gaz konsantrasyonu ve diğer proses parametrelerinin izlenmesine olanak sağlamakta; elde edilen veriler AI modelleriyle değerlendirilerek ürün kalitesi ve proses koşullarına ilişkin tahminler oluşturulabilmektedir. Bu sensörlerin nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) altyapısıyla bütünleştirilmesi, farklı üretim noktalarından elde edilen verilerin merkezi olarak toplanmasını ve analiz edilmesini desteklemektedir. Akıllı sensörler, IoT ve AI uygulamaları bu yönüyle Endüstri 4.0 kapsamında gıda üretiminde dijitalleşme ve otomasyonun temel bileşenleri arasında değerlendirilmektedir (Hassoun ve ark., 2022).

Bilgisayarlı görüntüleme ve sensör verilerinin AI algoritmalarıyla bütünleştirilmesi, gıda işleme süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve kontrolü açısından önemli olanaklar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin endüstriyel ölçekte güvenilir biçimde uygulanabilmesi için sensör kalibrasyonu, veri standardizasyonu ve model doğrulama

süreçlerinin dikkatle yürütülmesi; ayrıca gıda matrisine ve üretim koşullarına özgü değişkenliğin dikkate alınması gerekmektedir.

3. GIDA ENDÜSTRİSİNDE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Yapay zekâ (AI) teknolojileri, gıda endüstrisinde üretim süreçlerinin modellenmesi, kalite parametrelerinin değerlendirilmesi, gıda güvenliği risklerinin belirlenmesi ve ürün geliştirme çalışmalarında giderek daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Gıda hammaddelerinin heterojen yapısı, işleme koşullarındaki değişkenlik ve ürün özellikleri arasındaki karmaşık ilişkiler, bazı durumlarda geleneksel matematiksel modellerin tahmin gücünü sınırlandırabilmektedir. AI tabanlı yöntemler ise deneysel ve endüstriyel verilerden yararlanarak bu karmaşık ilişkilerin modellenmesine, sınıflandırma ve tahmin işlemlerinin gerçekleştirilmesine, proses kontrolünün desteklenmesine ve karar verme süreçlerinin iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemlerin endüstriyel düzeyde etkin biçimde kullanılabilmesi ise model doğruluğu, veri kalitesi ve farklı üretim koşullarındaki güvenilirlik gibi unsurlara bağlıdır (Mavani ve ark., 2022).

3.1. Gıda İşleme Süreçlerinin Optimizasyonu

Gıda işleme süreçlerinde ürün kalitesinin korunması, enerji tüketiminin azaltılması ve üretim verimliliğinin artırılması, proses parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesini gerektirmektedir. Sıcaklık, işlem süresi, basınç, nem ve akış hızı gibi değişkenler; gıdaların fiziksel, kimyasal ve duyuşal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu değişkenler arasındaki ilişkilerin doğrusal olmaması, özellikle çok parametrelili üretim sistemlerinde proses optimizasyonunu güçleştirmektedir. AI tabanlı modelleme yöntemleri, deneysel veriler aracılığıyla proses değişkenleri ile ürün özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesine olanak tanımaktadır (Canatan ve ark., 2025).

Kurutma işlemi, AI destekli proses modellemesinin öne çıktığı uygulama alanlarından biridir. Kurutma sırasında sıcaklık, hava hızı, bağıl nem ve ürün kalınlığı gibi parametreler, nem uzaklaştırma hızını ve ürünün son kalite özelliklerini etkilemektedir. İşlem koşullarının uygun belirlenmemesi, enerji tüketiminin artmasına ve renk, doku veya besin bileşenlerinde istenmeyen değişimlerin meydana gelmesine neden olabilmektedir. ANN modelleri, deneysel kurutma verilerinden yararlanarak nem içeriği ve kurutma kinetiği gibi parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca bulanık mantık tabanlı kontrol sistemleri, sıcaklık ve nem gibi proses değişkenlerinin belirlenen koşullar altında düzenlenmesine yönelik bir yaklaşım sunmaktadır (Arteaga-Cabrera ve ark., 2025).

AI modelleri, ekstraksiyon işlemlerinde de proses koşullarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Gıda hammaddelerinden fenolik bileşikler, pigmentler, aroma bileşenleri ve diğer biyoaktif maddelerin ekstraksiyonunda sıcaklık, süre, çözücü konsantrasyonu ve uygulanan enerji düzeyi gibi parametreler ekstraksiyon verimini etkilemektedir. Özellikle ultrases destekli ekstraksiyon gibi çok değişkenli işlemlerde, proses parametreleri arasındaki etkileşimlerin belirlenmesi önem taşımaktadır. ANN tabanlı modeller, deneysel veriler üzerinden ekstraksiyon verimi veya hedef bileşen konsantrasyonu gibi yanıtların tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir (Hussain ve ark., 2025). Model tahminlerinin optimizasyon algoritmalarıyla birleştirilmesi, belirlenen kalite ve verim kriterlerine uygun işlem koşullarının araştırılmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, model tarafından önerilen optimum koşulların bağımsız deneylerle doğrulanması gerekmektedir.

Fermantasyon süreçlerinde AI uygulamaları, mikroorganizma gelişiminin ve buna bağlı biyokimyasal değişimlerin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Fermentasyon sırasında sıcaklık, pH, substrat konsantrasyonu ve işlem süresi gibi değişkenler mikrobiyal aktiviteyi ve son ürün özelliklerini etkilemektedir. Bu süreçlerin modellenmesinde ANN yöntemlerinden yararlanılarak mikrobiyal popülasyonların değişimi ve proses performansı tahmin edilebilmektedir. Böylece fermantasyon koşullarının değerlendirilmesi ve üretimde karşılaşılan değişkenliğin daha ayrıntılı incelenmesi mümkün olmaktadır (Bhagya Raj ve Dash, 2022).

3.2. Gıda Kalite Kontrolü ve Güvenliği

Gıda endüstrisinde kalite kontrolü, hammaddenin kabulünden son ürünün değerlendirilmesine kadar farklı aşamalarda gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve duyu analizleri kapsamaktadır. Geleneksel kalite kontrol yöntemlerinde numune hazırlama, analiz süresi ve uzman personel gereksinimi, özellikle yüksek üretim kapasitesine sahip işletmelerde önemli sınırlılıklar oluşturabilmektedir. AI destekli görüntüleme ve sensör sistemleri, ölçüm verilerinin hızlı değerlendirilmesine ve kalite özelliklerinin nesnel kriterlere göre sınıflandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bilgisayarlı görüntü işleme sistemleri, gıda endüstrisinde ürün tanıma, kusur tespiti, ayıklama ve sınıflandırma amacıyla kullanılabilmektedir (Sharma ve ark., 2026).

Meyve ve sebzelerde renk, şekil, boyut ve yüzey kusurları, kalite sınıflandırmasında değerlendirilen başlıca özellikler arasındadır. Görüntü işleme sistemleri aracılığıyla elde edilen

veriler, ML ve DL algoritmalarıyla analiz edilerek ürünlerin kalite özelliklerine göre ayrılması mümkün olmaktadır. CNN modelleri, görüntülerdeki ayırt edici özellikleri öğrenerek tazelik ve yüzey kalitesi gibi parametrelerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Altemimi ve ark., 2025).

Gıda kalite değerlendirmesinde spektroskopik yöntemler ve AI algoritmalarının birlikte kullanılması da önemli bir araştırma alanıdır. Yakın kızılötesi (NIR) spektroskopi ve HSI yöntemleri, gıdaların kimyasal bileşimi ve fizikokimyasal özellikleriyle ilişkili spektral verilerin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu veriler ML modelleriyle değerlendirildiğinde, belirli kalite özelliklerinin tahmini ve ürünlerin sınıflandırılması gerçekleştirilebilmektedir. Saha ve Manickavasagan (2021), hiperspektral görüntüleme ile ML yöntemlerinin birlikte kullanılmasının gıda ürünlerinin kalite özelliklerinin tahribatsız değerlendirilmesinde önemli bir potansiyel taşıdığını bildirmiştir. Spektral analizlerin AI modelleriyle desteklenmesi, özellikle laboratuvar analizlerine ihtiyaç duyulan bazı kalite parametrelerinin hızlı tarama yöntemleriyle değerlendirilmesine yönelik olanaklar sunmaktadır.

Gıda güvenliği açısından AI uygulamaları, patojen kontaminasyonu, mikrobiyal gelişme, hijyen koşulları ve çevresel risk faktörlerinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Gıda kaynaklı patojenlerin varlığı, üretim ortamındaki çevresel koşullardan ve hammaddenin özelliklerinden etkilenebilmektedir. ML algoritmaları, çevresel izleme çalışmalarından elde edilen çok değişkenli veriler kullanılarak kontaminasyonla ilişkili faktörlerin belirlenmesinde uygulanmaktadır (Aghababaei ve ark., 2025).

Gıda üretim tesislerinde kontaminasyon risklerinin değerlendirilmesine yönelik simülasyon modelleri de geliştirilmektedir. Özellikle *Listeria* türlerinin üretim ortamındaki yayılımı, yüzeyler ve ekipmanlar arasındaki bulaşma olasılıklarının değerlendirilmesini gerektirmektedir. Zoellner ve ark. (2019), soğuk tütsülenmiş somon üretim tesisinde *Listeria* kontaminasyonunu değerlendirmek amacıyla etmen tabanlı bir simülasyon modeli geliştirmiştir. EnABLE olarak adlandırılan bu model, çevresel izleme verilerinin değerlendirilmesine ve olası bulaşma yollarının araştırılmasına yönelik bir çerçeve sunmaktadır. Modelleme yaklaşımları, hijyen uygulamalarının planlanmasında ve kontaminasyon riskini azaltmaya yönelik alternatif önlemlerin karşılaştırılmasında karar destek aracı olarak kullanılabilir.

Mikrobiyolojik güvenlik değerlendirmesinde genomik verilerin AI ve biyoinformatik yöntemlerle analizi de dikkat çekmektedir. Yüksek verimli dizileme teknolojileri, gıda

örneklerindeki mikroorganizmaların genetik özelliklerinin araştırılmasına olanak tanımaktadır. Ancak bu yöntemlerle elde edilen büyük veri kümelerinin işlenmesi, gelişmiş hesaplama ve sınıflandırma yöntemlerini gerektirmektedir. Haiminen ve ark. (2019), yüksek protein içerikli toz ürünlerde gıda kimlik doğrulamasına yönelik olarak dizileme verilerini kullanan bir biyoinformatik yaklaşım geliştirmiştir. Bu tür yöntemler, gıdaların biyolojik bileşiminin değerlendirilmesi ve ürün kimliğinin doğrulanmasında kullanılabilecek veri temelli araçlar sunmaktadır.

AI destekli yöntemler, Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları (HACCP) sisteminin uygulanmasında da tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Üretim sırasında sıcaklık, süre, pH ve diğer kritik parametrelerden elde edilen verilerin analiz edilmesi, sapmaların erken belirlenmesine ve risk değerlendirmelerinin desteklenmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, AI modelleri gıda güvenliğinin sağlanması için gerekli doğrulama, izleme ve kayıt prosedürlerinin yerine geçmemektedir. Model sonuçlarının mevzuat gereklilikleri ve bilimsel olarak doğrulanmış güvenlik kriterleri çerçevesinde değerlendirilmesi gerekmektedir (Patel, 2026).

3.3. Raf Ömrü Tahmini ve Depolama Yönetimi

Gıdaların raf ömrü; ürün bileşimi, işleme koşulları, ambalaj özellikleri ve depolama ortamı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Depolama süresince meydana gelen fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve duyuşal değişimler, ürünün kalite özelliklerinin azalmasına ve tüketilebilirliğinin sınırlandırılmasına neden olabilmektedir. Raf ömrünün doğru belirlenmesi, tüketici güvenliğinin sağlanması, ürünlerin pazarlama süresinin planlanması ve gıda kayıplarının azaltılması açısından önemlidir. Geleneksel raf ömrü çalışmalarında ürünler belirli koşullarda depolanmakta ve seçilen kalite parametreleri düzenli aralıklarla analiz edilmektedir. Ancak özellikle uzun raf ömrüne sahip ürünlerde gerçek zamanlı depolama testleri önemli ölçüde zaman gerektirmektedir. Bu nedenle hızlandırılmış raf ömrü testleri ve tahmin modelleri, gıda endüstrisinde ürün stabilitesinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Muniandy ve ark., 2022).

Raf ömrü tahmininde kullanılan geleneksel kinetik modeller, kalite değişimlerinin zamana ve sıcaklığa bağlı olarak değerlendirilmesine dayanmaktadır. Arrhenius eşitliği ve Q_{10} yaklaşımı, sıcaklığın bozulma reaksiyonları üzerindeki etkisinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler arasındadır. Bununla birlikte, gıdalardaki kalite kayıpları çoğu zaman birden fazla değişkenin etkisiyle gerçekleşmektedir. Ürünün su aktivitesi, oksijenle teması, ambalaj

geçirgenliği ve mikrobiyolojik özellikleri gibi faktörler, depolama sürecindeki değişimlerin değerlendirilmesini güçleştirebilmektedir. AI tabanlı modeller, bu değişkenler arasındaki karmaşık ilişkilerin analiz edilmesine ve raf ömrünün farklı depolama koşulları altında tahmin edilmesine yönelik alternatif bir yaklaşım sunmaktadır (Sharma ve ark., 2026).

ANN modelleri, gıdaların depolama sürecinde kalite özelliklerinde meydana gelen doğrusal olmayan değişimlerin modellenmesi ve raf ömrünün tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Sıcaklık, depolama süresi, bağıl nem ve başlangıç kalite özellikleri gibi değişkenler girdi olarak kullanılırken; mikrobiyal yük, renk, oksidasyon göstergeleri ve diğer kalite parametreleri çıktı olarak modellenebilmektedir. Bu modeller süt ürünleri, et, su ürünleri, meyve ve sebzeler gibi farklı gıda gruplarında uygulanmakta; model başarısının değerlendirilmesinde RMSE ve korelasyon katsayısı gibi istatistiksel göstergelerden yararlanılmaktadır (Shi ve ark., 2024).

Raf ömrü tahmininin önemli uygulama alanlarından biri prediktif mikrobiyolojidir. Bu yaklaşımda mikroorganizmaların gelişme, canlılığını sürdürme veya inaktivasyon davranışları, gıda özellikleri ve çevresel koşullar dikkate alınarak modellenmektedir. Geleneksel prediktif mikrobiyoloji modelleri, mikrobiyal popülasyonların zamana bağlı değişimini tanımlayan birincil modeller ve çevresel faktörlerin mikrobiyal gelişme parametreleri üzerindeki etkisini açıklayan ikincil modeller temelinde geliştirilmektedir. ML yöntemleri ise çok değişkenli mikrobiyolojik veri kümelerinin analiz edilmesinde kullanılabilecek alternatif modelleme araçları sunmaktadır. AI destekli modellerin mikrobiyal risk değerlendirmesinde kullanılabilmesi için farklı gıda matrislerinde ve depolama koşullarında doğrulanması gerekmektedir (Opara ve ark., 2025)

Raf ömrü tahmininde sensör teknolojilerinin kullanılması, depolama koşullarının daha ayrıntılı izlenmesine olanak tanımaktadır. Sıcaklık, bağıl nem, oksijen ve diğer çevresel değişkenlerden elde edilen veriler, AI modelleri aracılığıyla değerlendirilerek ürün kalitesindeki olası değişimler tahmin edilebilmektedir. Özellikle soğuk zincirde meydana gelen sıcaklık dalgalanmalarının izlenmesi, bozulabilir ürünlerin kalan raf ömrünün değerlendirilmesi açısından önemlidir. IoT tabanlı izleme sistemlerinin AI modelleriyle bütünleştirilmesi, depolama ve taşıma koşullarının dinamik olarak analiz edilmesine yönelik olanaklar sunmaktadır. Bu uygulamalar, ürünlerin uygun depolama koşullarında tutulmasına ve gıda kayıplarını azaltmaya yönelik kararların desteklenmesine katkı sağlamaktadır (Navina ve ark., 2026).

3.4. Gıda Formülasyonu ve Yeni Ürün Geliştirme

Yeni gıda ürünlerinin geliştirilmesi, bileşenlerin belirli oranlarda bir araya getirilmesini ve elde edilen ürünün kalite, besinsel değer, teknolojik özellikler ve tüketici kabulü açısından değerlendirilmesini gerektirmektedir. Formülasyon çalışmalarında kullanılan hammaddelerin fizikokimyasal özellikleri ve bileşenler arasındaki etkileşimler, son ürünün yapısal ve duyuşal özelliklerini etkileyebilmektedir. Özellikle fonksiyonel bileşenlerle zenginleştirilmiş ürünlerin geliştirilmesinde, birden fazla kalite kriterinin eş zamanlı değerlendirilmesi gerekmektedir. AI tabanlı modelleme yöntemleri, formülasyon değişkenleri ile ürün özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesinde kullanılabilmektedir (Mavani ve ark., 2022; Zatsu ve ark., 2024).

Gıda formülasyonlarının geliştirilmesinde ANN gibi veri temelli modeller, bileşen konsantrasyonları ile ölçülen ürün özellikleri arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda protein, yağ, karbonhidrat, diyet lifi veya diğer fonksiyonel bileşenlerin oranları girdi değişkenleri olarak kullanılabılırken; viskozite, tekstür, renk ve duyuşal değerlendirme sonuçları çıktı değişkenleri olarak tanımlanabilmektedir. Elde edilen modeller, belirlenen formülasyon aralığında ürün özelliklerinin tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir. Özellikle doğrusal olmayan bileşen etkileşimlerinin bulunduğu sistemlerde, AI tabanlı yaklaşımlar deneysel verilerin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Wang, 2025).

Ürün geliştirme çalışmalarında duyuşal özelliklerin modellenmesi, AI tabanlı yaklaşımların önemli kullanım alanlarından biridir. Tüketicilerin tat, aroma, tekstür ve genel kabul edilebilirliğe ilişkin değerlendirmeleri ürün bileşimi ve işleme koşullarıyla ilişkilendirilebilmekte; özellikle bulanık mantık yöntemleri, duyuşal analizlerdeki belirsizliklerin ve sözel derecelendirmelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. AI ayrıca farklı formülasyonların karşılaştırılması, deneysel çalışmaların planlanması ve kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımlarının geliştirilmesinde de potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, model güvenilirliği kullanılan veri miktarına, formülasyon aralığının yeterince temsil edilmesine ve tahminlerin duyuşal, fizikokimyasal ve gerektiğinde mikrobiyolojik analizlerle doğrulanmasına bağlıdır. Bu nedenle AI tabanlı yöntemler, ürün geliştirmede deneysel çalışmaları destekleyen karar verme ve modelleme araçları olarak değerlendirilmelidir (Agrawal ve ark., 2025; Liakos ve ark., 2025).

4. GÜNCEL TEKNOLOJİK GELİŞMELER VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Gıda endüstrisinde dijital teknolojilerin gelişimi, üretim süreçlerinin izlenmesi ve kontrolünde veri odaklı yaklaşımların yaygınlaşmasını sağlamıştır. AI'nin akıllı sensörler, nesnelerin interneti, robotik sistemler ve büyük veri analitiği ile bütünleştirilmesi; üretim verimliliği, kaynak kullanımı ve ürün kalitesinin iyileştirilmesine yönelik önemli olanaklar sunmaktadır (Agrawal ve ark., 2025; Canatan ve ark., 2025). Bu dönüşüm, Endüstri 4.0'ın otomasyon ve bağlantılı üretim anlayışından, sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve insan odaklılığı öne çıkaran Endüstri 5.0 yaklaşımına doğru ilerlemektedir (Hassoun ve ark., 2024).

4.1. Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti ve Dijital İkizler

Endüstri 4.0, üretim sistemlerinde dijital teknolojiler, otomasyon ve veri temelli karar verme mekanizmalarının bütünleştirilmesine dayanan bir dönüşüm yaklaşımıdır. Bu kapsamda nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT), siber-fiziksel sistemler, büyük veri analitiği, bulut bilişim ve AI teknolojileri üretim süreçlerinin dijitalleşmesinde temel rol oynamaktadır. Gıda endüstrisinde bu teknolojiler; proses verilerinin merkezi olarak toplanması, üretim koşullarının izlenmesi ve ekipman performansının değerlendirilmesini desteklemektedir. AI, akıllı sensörler, robotik sistemler ve dijital ikiz uygulamaları da Gıda Endüstrisi 4.0 kapsamında gıda işleme ve kalite kontrol süreçlerinde önemli potansiyel taşımaktadır (Hassoun ve ark., 2022).

IoT, fiziksel cihazların ve sensörlerin iletişim ağları üzerinden birbirleriyle veya merkezi veri sistemleriyle bağlantı kurmasını sağlayan bir teknolojidir. Gıda üretim tesislerinde sıcaklık, basınç, nem, akış hızı ve enerji tüketimi gibi proses parametreleri sensörler aracılığıyla izlenebilmektedir. Elde edilen veriler, AI algoritmalarıyla değerlendirilerek proses performansının tahmin edilmesinde ve üretim koşullarındaki değişimlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Özellikle soğuk zincir yönetimi, depolama koşullarının izlenmesi ve ekipman performansının değerlendirilmesi, IoT tabanlı sistemlerin gıda endüstrisindeki başlıca uygulama alanları arasında yer almaktadır (Dakhia ve ark., 2025).

Endüstri 4.0 kapsamında öne çıkan teknolojilerden biri de dijital ikizdir (Digital Twin). Dijital ikiz, fiziksel bir sistemin dijital ortamda temsil edilmesine ve gerçek sistemden elde edilen verilerle güncellenmesine dayanan bir modelleme yaklaşımıdır. Gıda endüstrisinde bu teknoloji, üretim ve işleme süreçlerinin izlenmesi, modellenmesi ve tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek veri gereksinimi ve disiplinler arası modelleme ihtiyacı, dijital ikizlerin otonom kontrol sistemlerine entegrasyonunu sınırlayan başlıca unsurlar arasında yer almaktadır (Henrichs ve ark., 2022).

Dijital ikiz teknolojileri, gıda endüstrisinde üretim performansının ve tedarik zinciri süreçlerinin iyileştirilmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bir gıda işleme işletmesinde gerçekleştirilen uygulamada dijital ikiz modelinin ekipman kullanılabilirliği, teknik verimlilik, iş gücü verimliliği ve üretim kapasitesini olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir (Maheshwari ve ark., 2023a).

Dijital ikizlerin tedarik zinciri yönetimindeki kullanımını inceleyen başka bir çalışmada, Maheshwari ve ark. (2023b), orta ölçekli bir gıda işletmesinde tedarik, üretim ve dağıtım faaliyetlerini bütünlük olarak modellemiştir. Karma tam sayılı doğrusal programlama ve etmen tabanlı simülasyon yöntemlerinin kullanıldığı araştırmada, geliştirilen sistemle %94 hizmet düzeyine ulaşılmıştır. Pastörizatör ve dinlendirme tankının kullanım oranı %65, dondurucunun kullanım oranı ise %97 olarak bildirilmiştir. Dijital ikiz modelinin uygulanmasıyla birikmiş iş miktarında %6 azalma sağlanmıştır. Bu sonuçlar, dijital ikiz teknolojilerinin üretim planlaması ve kaynak kullanımının değerlendirilmesinde uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu bulgular, dijital ikizlerin üretim planlaması ve kaynak kullanımının optimizasyonunda uygulanabilirliğini göstermektedir. Ayrıca fiziksel süreç modellerinin sensör verileri ve veri analitiğiyle bütünleştirilmesi, farklı proses koşullarının değerlendirilmesine ve daha etkin kontrol stratejilerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Verboven ve ark., 2020).

4.2. AI Destekli Sürdürülebilir Gıda Üretimi

Gıda endüstrisinde sürdürülebilir üretim; enerji, su ve hammadde kullanımının iyileştirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve gıda kayıplarının önlenmesi açısından önem taşımaktadır. AI tabanlı tahmin ve optimizasyon modelleri, üretim verilerinin analiz edilerek kaynak tüketimini etkileyen proses değişkenlerinin belirlenmesine olanak sağlamak; özellikle kurutma, ısıtma işlem ve soğutma gibi enerji yoğun işlemlerde ürün kalitesi ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin değerlendirilmesini desteklemektedir (Harikrishnan ve ark., 2025). AI ve ML yöntemleri ayrıca talep tahmini, stok yönetimi ve tedarik zinciri optimizasyonu yoluyla aşırı üretim ve gıda kayıplarının azaltılmasında kullanılabilmektedir. Fazla gıdaların yeniden dağıtımı ve kaynak kullanımının iyileştirilmesine yönelik bu uygulamalar, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir gıda sistemleri açısından da önemli potansiyel taşımaktadır (Onyeaka ve ark., 2023).

Gıda tedarik zincirinde izlenebilirlik, sürdürülebilirlik ve gıda güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Üretimden dağıtıma kadar oluşturulan kayıtların bütünlüğünün korunması ve

paylaşılması amacıyla blokzincir teknolojisinden yararlanılmakta; bu altyapı AI tabanlı veri analizleriyle bütünleştirilebilmektedir. AI ve diğer Endüstri 4.0 teknolojileri, gıda bütünlüğünün korunması, risk değerlendirmesi ve tedarik zinciri izlenebilirliğinin geliştirilmesinde önemli katkılar sunmaktadır (Gbashi ve Njobeh, 2024).

Bu dijital dönüşüm, Endüstri 5.0 kapsamında insan odaklılık, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık ilkeleriyle daha bütünleşik bir yapıya evrilmektedir. AI, iş birlikçi robotlar, gelişmiş sensörler, dijital ikizler ve siber-fiziksel sistemler bu dönüşümün temel bileşenleri arasında yer almakla birlikte, büyük ölçekli uygulamalarda ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel etkilerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Hassoun ve ark., 2024). AI tabanlı sistemlerin sürdürülebilirliğe katkısı değerlendirilirken sağladıkları verimlilik artışının yanında sensör altyapısı, veri depolama ve hesaplama sistemlerinin enerji gereksinimleri de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle enerji tüketimi, hammadde kullanımı, atık oluşumu ve proses verimliliği gibi göstergeler birlikte değerlendirilmelidir.

4.3. AI Uygulamalarının Sınırlılıkları ve Gelecekteki Potansiyeli

AI teknolojilerinin gıda endüstrisinde yaygınlaşması; veri kalitesi, model güvenilirliği, teknik altyapı ve ekonomik uygulanabilirlik gibi çeşitli sınırlılıkları beraberinde getirmektedir. Model performansı büyük ölçüde kullanılan verilerin doğruluğu ve temsil gücüne bağlı olduğundan, gıda hammaddelerindeki doğal varyasyonlar ve üretim koşullarındaki farklılıklar modellerin farklı işletmelere genellenmesini güçleştirebilmektedir. Veri standardizasyonu, sistem entegrasyonu, hesaplama gereksinimleri ve etik konular da uygulamayı sınırlandıran başlıca unsurlar arasındadır (Yang ve ark., 2025).

Endüstriyel kullanım açısından bir diğer önemli konu model sonuçlarının yorumlanabilirliğidir. Özellikle karmaşık yapay sinir ağı modellerinde tahminlerin hangi değişkenlerden etkilendiğinin açıklanması zorlaşabilmektedir. Açıklanabilir yapay zekâ (Explainable Artificial Intelligence, XAI) bu sorunu azaltmayı amaçlamasına rağmen açıklanabilirlik tek başına bilimsel geçerlilik anlamına gelmemektedir. Gıda güvenliği ve kalite kontrolünde kullanılacak modellerin bağımsız veri kümeleri ve uygun deneysel yöntemlerle doğrulanması gerekmektedir (Ahmad ve ark., 2026). Teknolojik altyapı, sensör sistemleri, yazılım gereksinimleri ve uzman personel ihtiyacı özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için önemli maliyetler oluşturabilmektedir. Dijital ikiz uygulamalarında da güvenilir modelleme için yeterli veri altyapısı ve disiplinler arası uzmanlık gereklidir (Henrichs ve ark., 2022).

Gelecekteki çalışmaların, model doğruluğunun ötesinde gerçek üretim koşullarında doğrulama, ölçeklenebilirlik, ekonomik uygulanabilirlik, çevresel etkiler ve mevzuata uyum gibi unsurları birlikte değerlendirmesi gerekmektedir. Özellikle dijital ikizler, gelişmiş sensörler, XAI ve insan-makine iş birliğine dayalı Endüstri 5.0 uygulamaları gıda endüstrisinde önemli araştırma alanları olarak öne çıkmaktadır (Hassoun ve ark., 2024).

5. SONUÇ

AI teknolojileri, gıda endüstrisinde üretim süreçlerinin modellenmesi, kalite kontrolü, gıda güvenliği, raf ömrü tahmini ve yeni ürün geliştirme çalışmalarında önemli uygulama alanlarına sahiptir. Makine öğrenmesi, derin öğrenme ve yapay sinir ağları gibi yöntemler, karmaşık veri kümelerinin analiz edilmesine ve proses değişkenleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Özellikle görüntü işleme ve sensör teknolojileriyle bütünleştirilen AI sistemleri, kalite özelliklerinin hızlı değerlendirilmesi ve üretim süreçlerinin izlenmesi açısından önemli olanaklar sunmaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında gelişen IoT, dijital ikizler ve otomasyon teknolojileri, gıda üretim sistemlerinde veri temelli karar verme yaklaşımlarının yaygınlaşmasını desteklemektedir. Bu teknolojilerin sürdürülebilirlik açısından katkıları, kaynak tüketiminin değerlendirilmesi, üretim kayıplarının azaltılması ve tedarik zinciri yönetiminin iyileştirilmesiyle ilişkilidir. Bununla birlikte, AI uygulamalarının endüstriyel ölçekte yaygınlaştırılması için veri kalitesi, model güvenilirliği, teknik altyapı ve ekonomik uygulanabilirlik konularındaki sınırlılıkların giderilmesi gerekmektedir. Gelecekte AI teknolojilerinin gıda endüstrisindeki kullanımının, gelişmiş sensör sistemleri, dijital ikizler ve açıklanabilir AI yaklaşımlarıyla genişlemesi beklenmektedir. Ancak bu teknolojilerin güvenilir biçimde uygulanabilmesi, deneysel doğrulama çalışmalarına ve gıda mühendisliği ilkeleriyle uyumlu modelleme yaklaşımlarına bağlıdır. Bu nedenle AI sistemlerinin geliştirilmesinde teknolojik performansın yanı sıra gıda kalitesi, güvenliği ve sürdürülebilir üretim gerekliliklerinin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Aghababaei, A., Aghababaei, F., Pignitter, M., & Hadidi, M. (2025). Artificial intelligence in agro-food systems: From farm to fork. *Foods*, 14(3), 411. <https://doi.org/10.3390/foods14030411>.
- Agrawal, K., Göktaş, P., Kumar, N., & Leung, M.-F. (2025). Artificial intelligence in personalized nutrition and food manufacturing: a comprehensive review of methods, applications, and future directions. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1636980. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1636980>.
- Ahmad, A., Murad, M., Utra, U., Yussof, N. S., Fazial, F. F., Lazim, A., ... & Law, D. (2026). Transforming food systems with artificial intelligence: Challenges, governance, and pathways for sustainable integration. *Food Reviews International*, 42(5), 3150-3175. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2585134>.
- Altemimi, A. B., Awlqadr, F. H., Al-Hatim, R. R., Qadir, S. A., Saeed, M. N., Faraj, A. M., ... & Cacciola, F. (2025). AI-Powered Advancements in Food Analysis and Safety: Ensuring Quality, Protection, and Precision in Modern Food Systems: A Review. *EFood*, 6(4), e70076. <https://doi.org/10.1002/efd2.70076>.
- Arteaga-Cabrera, E., Ramírez-Márquez, C., Sánchez-Ramírez, E., Segovia-Hernández, J. G., Osorio-Mora, O., & Gómez-Salazar, J. A. (2025). Advancing optimization strategies in the food industry: From traditional approaches to multi-objective and technology-integrated solutions. *Applied Sciences*, 15(7), 3846. <https://doi.org/10.3390/app15073846>.
- Bhagya Raj, G. V. S., & Dash, K. K. (2022). Comprehensive study on applications of artificial neural network in food process modeling. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2756–2783. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1858398>.
- Canatan, M., Alkhulaifi, N., Watson, N., & Boz, Z. (2025). Artificial intelligence in food manufacturing: a review of current work and future opportunities. *Food Engineering Reviews*, 17(2), 189-219. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09395-1>.
- Chaurasia, S. K., Kumar, V., Fatima, S., & Gupta, A. (2025). Applications of Fuzzy Logic as a Smart Tool for Food Quality Management (pp. 101–132). <https://doi.org/10.1039/9781837679119-00101>.

- Dakhia, Z., Russo, M., & Merenda, M. (2025). AI-enabled IoT for food computing: Challenges, opportunities, and future directions. *Sensors*, 25(7), 2147. <https://doi.org/10.3390/s25072147>.
- Gbashi, S., & Njobeh, P. B. (2024). Enhancing food integrity through artificial intelligence and machine learning: a comprehensive review. *Applied Sciences*, 14(8), 3421. <https://doi.org/10.3390/app14083421>.
- Haiminen, N., Edlund, S., Chambliss, D., Kunitomi, M., Weimer, B. C., Ganesan, B., ... & Beck, K. L. (2019). Food authentication from shotgun sequencing reads with an application on high protein powders. *NPJ science of food*, 3(1), 24. <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0056-6>.
- Han, J., Li, T., He, Y., & Gao, Q. (2022). Using machine learning approaches for food quality detection. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 6852022. <https://doi.org/10.1155/2022/6852022>.
- Harikrishnan, S., Kaushik, D., Rasane, P., Kumar, A., Kaur, N., Reddy, C. K., ... & Kumar, M. (2025). Artificial intelligence in sustainable food design: Technological, ethical consideration, and future. *Trends in Food Science & Technology*, 163, 105152. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105152>.
- Hassoun, A., Aït-Kaddour, A., Abu-Mahfouz, A. M., Rathod, N. B., Bader, F., Barba, F. J., Biancolillo, A., Crobotova, J., Galanakis, C. M., Jambrak, A. R., Lorenzo, J. M., Måge, I., Özoğul, F., & Regenstein, J. M. (2022). The fourth industrial revolution in the food industry—Part I: Industry 4.0 technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(23), 6547–6563. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735>.
- Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Abdullah, N. A., Gökşen, G., Bader, F., Özoğul, F., Barba, F. J., Crobotova, J., Munekeata, P. E. S., & Lorenzo, J. M. (2022). Food processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution. *Food Control*, 145, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109507>.
- Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Duong, L. N., Saxena, P., ... & Aït-Kaddour, A. (2024). From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 23(6), e370040. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70040>.

- Henrichs, E., Noack, T., Pinzon Piedrahita, A. M., Salem, M. A., Stolz, J., & Krupitzer, C. (2022). Can a byte improve our bite? An analysis of digital twins in the food industry. *Sensors*, 22(1), 115. <https://doi.org/10.3390/s22010115>.
- Hussain, M. A., Khan, M. I. H., & Karim, A. (2025). Machine learning in transforming the food industry. *Foods*, 15(1), 90. <https://doi.org/10.3390/foods15010090>.
- Kakani, V., Nguyen, V. H., Kumar, B. P., Kim, H., & Pasupuleti, V. R. (2020). A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100033>.
- 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. <https://doi.org/10.3390/foods14193424>.
- Lwele, E., Shenfield, A., & da Silva, C. E. (2025). AI-based surrogate models for the food and drink manufacturing industry: a comprehensive review. *Processes*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/pr13092929>.
- Maheshwari, P., Kamble, S., Belhadi, A., Mani, V., & Abedin, M. Z. (2023b). Digital twin-driven real-time planning, monitoring, and controlling in food supply chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 195, 122799. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122799>.
- Maheshwari, P., Kamble, S., Belhadi, A., Mani, V., & Pundir, A. (2023a). Digital twin implementation for performance improvement in process industries—A case study of food processing company. *International Journal of Production Research*, 61(23), 8343–8365. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2104181>.
- Mavani, N. R., Ali, J. M., Othman, S., Hussain, M. A., Hashim, H., & Rahman, N. A. (2022). Application of artificial intelligence in food industry—A guideline. *Food Engineering Reviews*, 14(1), 134–175. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09290-z>.
- Navina, B., Huthaash, K. K., & Samuel, V. R. (2026). Shelf-life prediction through AI and ML to artificial intelligence in food science. In *Artificial intelligence in food science* (pp. 377-388). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26468-9.00039-4>.
- 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>.
- Opara, I. J., Fatola, M. E., Adeoba, M. I., Sodje, H. A., Chibueze, N. T., Olorunkosebi, M. T., & Akinmolayemi, A. T. (2025). AI-driven predictive microbiology with real-time sensors for next-generation food safety. *Journal of Life Science and Public Health*, 1(2), 79-89. <https://doi.org/10.69739/jlsph.v1i2.1299>.
- Patel, K. (2026). AI-Powered HACCP Risk Prediction System: Machine Learning Framework for Predictive Risk Assessment in HACCP-Based Food Safety Systems. *Journal of Intelligent Decision Making and Information Science*, 3(5s), 1956-1978.
- Saha, D., & Manickavasagan, A. (2021). Machine learning techniques for analysis of hyperspectral images to determine quality of food products: A review. *Current Research in Food Science*, 4, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.01.002>.
- Sharma, R., Agarwal, M., & Singh, B. (2026). Enhancing food quality analysis: the transformative role of artificial neural networks in modern analytical techniques. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 56(6), 1627-1644. <https://doi.org/10.1080/10408347.2025.2505081>.
- Shi, C., Zhao, Z., Jia, Z., Hou, M., Yang, X., Ying, X., & Ji, Z. (2024). Artificial neural network-based shelf life prediction approach in the food storage process: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(32), 12009–12024. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2245899>.
- Verboven, P., Defraeye, T., Datta, A. K., & Nicolai, B. (2020). Digital twins of food process operations: The next step for food process models? *Current Opinion in Food Science*, 35, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>.
- 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>.
- Yang, H., Jiao, W., Zouyi, L., Diao, H., & Xia, S. (2025). Artificial intelligence in the food industry: innovations and applications. *Discover Artificial Intelligence*, 5(1), 60. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00296-8>.
- Zatsu, V., Shine, A. E., Tharakan, J. M., Peter, D., Ranganathan, T. V., Alotaibi, S. S., Mugabi, R., Muhsinah, A. B., Waseem, M., & Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing the food industry: The transformative power of artificial

intelligence—A review. *Food Chemistry: X*, 24, 101867.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101867>.

Zoellner, C., Jennings, R., Wiedmann, M., & Ivanek, R. (2019). EnABLE: An agent-based model to understand *Listeria* dynamics in food processing facilities. *Scientific reports*, 9(1), 495. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36654-z>.

BÖLÜM 2

GIDA TEKNOLOJİSİNDE İNCE TABAKA KURUTMA TEMELLER, MODELLEME, DEĞERLENDİRME VE TASARIM

Aydın KILIÇ

1. GİRİŞ

Kurutma, suyun bir gıda matriksinden uzaklaştırılarak su aktivitesinin düşürülmesi, mikrobiyal gelişmenin engellenmesi, birçok enzimatik reaksiyonun yavaşlatılması ve depolama stabilitesinin artırılması amacıyla gerçekleştirilen bir muhafaza işlemidir. Bununla birlikte kurutma, gıdanın fiziksel yapısını ve kimyasal ortamını da değiştirir. Bu nedenle modern bir kurutma prosesinin amacı yalnızca mümkün olduğunca fazla su uzaklaştırmak değil, aynı zamanda enerjiyi kontrol ederek ve arzu edilen kalite özelliklerini koruyarak suyu uygun bir hızda uzaklaştırmaktır.



Gıda kurutmasına ilişkin derlemelerde, kurutmanın eş zamanlı ısı ve kütle transferini içerdiği ve matematiksel tanımlamaların proses tasarımı, optimizasyonu ve kontrolü açısından yararlı olduğu tekrar tekrar vurgulanmıştır (Erbay ve İcier, 2010; Onwude ve ark., 2016).

İnce tabaka kurutma, ürünün kontrollü kurutma havasına maruz bırakıldığı ve kütlesinin veya nem içeriğinin zamana bağlı olarak ölçüldüğü nispeten basit bir deneysel düzenek sağlaması nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Elde edilen kurutma eğrisi daha sonra teorik, yarı teorik veya ampirik eşitliklerle ifade edilebilir. Bu eşitlikler çoğunlukla kurutma süresinin tahmin edilmesi, proses koşullarının karşılaştırılması, etkili değişkenlerin belirlenmesi ve ölçek büyütme çalışmalarının desteklenmesi amacıyla kullanılır. Bununla birlikte ince tabaka modellemesinin basitliği, uygun olmayan model seçimini de teşvik edebilir. Yalnızca yüksek bir determinasyon katsayısı, bir modelin fiziksel olarak anlamlı olduğunu veya farklı çalışma koşullarında geçerliliğini sürdüreceğini göstermez (Kucuk ve ark., 2014; Buzrul, 2022).

2. İNCE TABAKA KURUTMANIN KAVRAMI VE BİLİMSEL TEMELİ

2.1. Tanım ve kapsam

İnce tabaka deneyinde gıda parçacıkları, dilimler, fileto parçaları, yapraklar, taneler veya diğer materyaller, kurutma ortamının açık yüzeyle temas edeceği ve yatak derinliği etkilerinin nispeten sınırlı olacağı şekilde düzenlenir. Bu terim, iç nem direncinin ihmal edilebilir olduğu anlamına gelmez. Aksine, ürün tabakasının yeterince sık olduğunu ve gözlenen nem kaybı eğrisinin belirli koşullar altındaki karakteristik kuruma tepkisi olarak yorumlanabileceğini ifade eder. Bu nedenle ince tabaka eşitlikleri; meyveler, sebzeler, tahıllar, otlar, balıklar ve fonksiyonel gıda bileşenleri dahil olmak üzere çok çeşitli tarımsal ve gıda materyallerinde kullanılmıştır (Ertekin ve Firat, 2017).

Yaklaşımın başlıca güçlü yönlerinden biri deneysel tekrarlanabilirliğidir. Sıcaklık, hava hızı, bağıl nem, tabaka kalınlığı, numune geometrisi, ön işlem ve örnekleme aralığı kontrol edilebilir ve raporlanabilir. Bu durum işlemler arasında karşılaştırma yapılmasına ve nem oranı verilerine regresyon modellerinin uygulanmasına olanak sağlar. Yaklaşım; kabin, tepsi, konvektif, kızılötesi, mikrodalga destekli, güneş enerjili, akışkan yataklı ve düşük sıcaklıklı sistemler dahil olmak üzere birçok kurutucu tipiyle de uyumludur (Kucuk ve ark., 2014; Onwude ve ark., 2016).

2.2. Isı ve kütle transferi

Kurutma, kurutma ortamından gıdaya enerji transferini ve bununla eş zamanlı olarak suyun iç kısımlardan yüzeye doğru hareket etmesini ve ardından buharlaşmasını içerir. Dış ısı transferi ile iç nem taşınımı arasındaki denge kurutma hızını belirler. Kurutmanın başlangıcında yüzeydeki nem nispeten hızlı buharlaşabilir. Kurutma ilerledikçe ürün yüzeyi daha az doygun hale gelebilir; iç difüzyon ve kapiler hareket giderek önem kazanır ve büzülme gibi yapısal değişiklikler taşınım yollarını değiştirebilir.

Gıdalarda sabit hız dönemi ile azalan hız dönemi arasındaki klasik ayrım deneysel olarak her zaman açık değildir. Birçok biyolojik materyal, özellikle başlangıçtaki uyum döneminden sonra, ağırlıklı olarak azalan hız davranışı gösterir. Azalan hız bölgesi genellikle nem taşınımına karşı iç direncin artmasıyla ilişkilidir. Bu durum, deneysel eğrileri heterojen gıda mikroyapısının tam bir tanımını gerektirmeden temsil edebildikleri için ampirik ve yarı teorik ince tabaka eşitliklerinin popüler hale gelmesinin nedenlerinden biridir (Erbay ve Icier, 2010).

2.3. Nem oranı

Nem oranı (MR), ince tabaka kurutmada en yaygın kullanılan normalize edilmiş değişkenlerden biridir. Yaygın olarak kullanılan eşitlik:

$$MR = (M - M_e)/(M_0 - M_e) \quad (1)$$

burada M , t anındaki nem içeriğini; M_0 başlangıç nem içeriğini ve M_e denge nem içeriğini ifade eder. M_e , M ve M_0 'a kıyasla küçük olduğunda, $MR = M/M_0$ şeklindeki basitleştirilmiş ifade de kullanılabilir. Denge neminin nasıl ele alındığı açıkça belirtilmelidir; çünkü denge neminin dikkate alınması, uyumlandırılan parametreleri ve model karşılaştırmalarını etkileyebilir.

MR kullanımı, farklı başlangıç nem içerikleri altında elde edilen eğrilerin daha kolay karşılaştırılmasını sağlar; ancak normalizasyon sıcaklık, bağıl nem, hava hızı, geometri, ön işlem veya ürün bileşiminden kaynaklanan farklılıkları ortadan kaldırmaz. Bu nedenle MR , proses farklılıklarını ortadan kaldıran evrensel bir düzeltme olarak değil, yararlı bir yanıt değişkeni olarak değerlendirilmelidir.

3. İNCE TABAKA KURUTMAYI BELİRLEYEN DENEYSEL DEĞİŞKENLER

3.1. Kurutma sıcaklığı

Kurutma sıcaklığı, kurutma hızını kontrol eden başlıca değişkenlerden biridir. Hava sıcaklığının artırılması genellikle buhar basıncı itici gücünü artırır ve nem uzaklaştırılmasını hızlandırır. Bununla birlikte sıcaklığa duyarlı pigmentler, vitaminler, aromalar, lipitler, proteinler veya yapısal bileşenler zarar gördüğünde gıda kalitesi olumsuz etkilenebilir. Bu nedenle optimum sıcaklık, kinetik hızlanma ile kalite korunması arasında bir uzlaşmadır. Kilic'in LTHV çalışmaları özellikle önemlidir; çünkü 4 °C gibi düşük sıcaklıklarda kurutmayı inceleyerek güçlü bir konvektif itici gücün düşük termal stres ile birleştirilebileceğini göstermiştir (Kilic, 2009, 2017).

3.2. Hava hızı ve bağıl nem

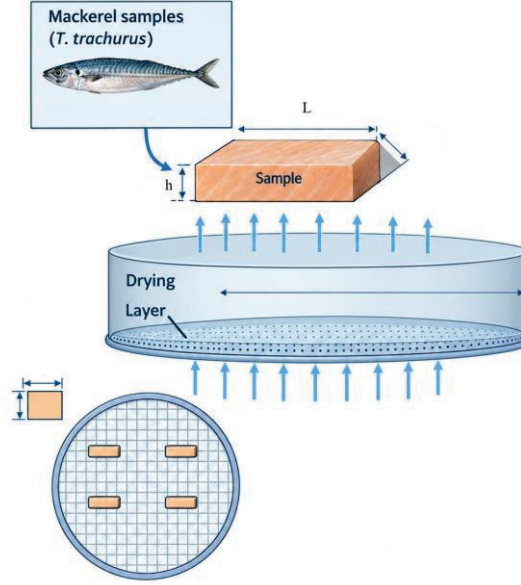
Hava hızı, dış sınır tabakasını ve dolayısıyla gıda yüzeyi ile kurutma havası arasındaki ısı ve su buharı transferini etkiler. LTHV kurutmada, hava sıcaklığı nispeten düşük tutulurken dış taşınımı yoğunlaştırmak amacıyla yüksek hava hızı kullanılır. Kilic (2009), 7 m/s hava hızı ve yaklaşık %40–50 bağıl neme dayanan bir LTHV düzeni bildirmiştir. Bu yaklaşım, sıcaklığın düşürülmesinin arzu edildiği ancak yeterli kurutma kapasitesinin korunması gereken gıdalar açısından önemlidir.

Bağıl nem, havanın nem taşıma kapasitesini kontrol eder. Belirli bir sıcaklıkta daha düşük bağıl nem genellikle buhar basıncı itici gücünü artırır. Ancak çok kuru hava otomatik olarak optimum değildir; enerji ihtiyacı, ürün yüzey davranışı ve kalite yanıtları birlikte değerlendirilmelidir. Bu nedenle ince tabaka deneylerinde yalnızca sıcaklık değil, bağıl nem de raporlanmalıdır.

3.3. Tabaka kalınlığı, numune boyutu ve geometri

Tabaka kalınlığı ve ürün geometrisi, karakteristik difüzyon mesafesini ve açık yüzey alanını etkiler. Diğer koşullar benzer olduğunda daha küçük kalınlığa sahip dilimler daha kalın dilimlerden genellikle daha hızlı kurur. Ertekin ve Firat (2017) tarafından incelenen daha geniş

ince tabaka literatüründe de şeklin ısı ve kütle transferini etkilediği gösterilmiştir. Güvenilir karşılaştırmalar için kalınlık, çap veya uzunluk, parça sayısı, yükleme yoğunluğu ve parçaların üst üste gelip gelmediği raporlanmalıdır.



Şekil 1. Örnek ince tabaka kurutucu tasarımı (Kilic 2025'ten değiştirilmiştir)

3.4. Ön işlem ve bileşim

Haşlama, ozmotik işlem, tuzlama, kesme, soyma, kimyasal ön işlem ve mekanik parçalama kurutma kinetiğini değiştirebilir. Gıda bileşimi de aynı derecede önemlidir. Şekerler, proteinler, tuzlar, lifler, lipitler ve hücresel yapı; suyun bağlanmasını ve taşınımını etkiler. Bu nedenle bir gıda için uygun olan matematiksel bir eşitlik, başka bir gıda veya proses koşulu için otomatik olarak evrensel bir model olarak kabul edilemez (Onwude ve ark., 2016).

4. İNCE TABAKA KURUTMANIN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

4.1. Teorik modeller

Teorik modeller, kurutma davranışını taşınım eşitliklerinden ve fiziksel kabullerden hareketle açıklamaya çalışır. Difüzyon temelli yaklaşımlar sıklıkla iç nem hareketini yaklaşık olarak tanımlamak için Fick'in ikinci yasasını kullanır. Basit geometriler ve sabit difüzivite için analitik çözümler elde edilebilir ve uygun biçimde dönüştürülmüş bir kurutma eğrisinin eğiminden etkin nem difüzivitesi tahmin edilebilir. Bu modeller fiziksel yorum olanağı sağlar; ancak gıda materyalleri nadiren homojen, izotropik ve sabit difüziviteli katılar gibi davranır. Büzülme, değişen gözeneklilik, sıcaklık gradyanları ve neme bağlı özellikler basit difüzyon kabullerinin geçerliliğini sınırlayabilir.

4.2. Yarı teorik ve ampirik modeller

Yarı teorik modeller, taşınım teorisi ile tamamen ampirik eğri uyumu arasında bir ara konumda bulunur. Page, Henderson–Pabis, logaritmik, iki terimli, Wang–Singh, Midilli–Kucuk ve benzeri eşitlikler gıda ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında sıklıkla bildirilen modeller arasındadır. Geniş bir literatür, farklı modellerin aynı veri setine görünüşte mükemmel istatistiklerle uyabileceğini göstermiştir. Bu nedenle model seçimi birden fazla kritere dayanmalı ve modelin kullanım amacı dikkate alınmalıdır (Kucuk ve ark., 2014; Ertekin ve Firat, 2017).

Örneğin;

$$MR = a \exp(-k t^n) + bt \quad (2)$$

şeklinde olabilir; burada a, k, n ve b uyumlandırılan parametrelerdir. Model, Midilli, Kucuk ve Yapar'ın (2002) mevcut tek tabaka modelleriyle önerilen eşitliği karşılaştırdığı çalışmadan ortaya çıkmıştır. Model daha sonra gıda kurutma çalışmalarında en sık kullanılan eşitliklerden biri haline gelmiştir.

Kucuk ve ark. (2014), Aydın Kilic'in ortak yazar olduğu çalışmalarında 67 ince tabaka kurutma eğrisi modelini ve 28 performans değerlendirme kriterini incelemiştir. Bu derleme, tartışmayı bir eşitliğin doğası gereği “en iyi” olduğu düşüncesinden uzaklaştırarak ürün tipi, ön işlem, kurutma parametreleri, tabaka kalınlığı, kurutma yöntemi ve istatistiksel performansa dayalı daha sistematik bir değerlendirmeye yöneltmesi bakımından önemlidir. Yazarlar ayrıca literatürde eşitliklerin ve değerlendirme kriterlerinin uygulanma biçimlerindeki tutarsızlıklara dikkat çekmiştir.

4.3. Model seçimi felsefesi

Model seçimi bir proses sorusuna yanıt vermelidir. Amaç dar bir deneysel aralık içinde enterpolasyon yapmaksa basit bir ampirik eşitlik yeterli olabilir. Amaç ekstrapolasyon, ölçek büyütme, kurutucu tasarımı veya mekanistik yorum ise daha güçlü fiziksel anlam taşıyan ve bağımsız olarak doğrulanmış bir model tercih edilmelidir. Çok sayıda parametre içeren bir model örneklem içi uyumu iyileştirirken yorumlana bilirliliği azaltabilir ve parametre belirsizliğini artırabilir. Buzrul (2022), aşırı karmaşık modellerin keyfi kullanımına karşı özellikle dikkat çekmiş ve belirsizliğin ve bir kurutma eğrisinin içerdiği sınırlı bilginin dikkate alınmasının önemini vurgulamıştır.

Bu nedenle sağlam bir iş akışı şu şekildedir: modelleme amacını tanımlamak; ham kurutma eğrisini incelemek, MR'yi tutarlı biçimde hesaplamak; sınırlı sayıda makul model seçmek; uygun olduğunda doğrusal olmayan regresyon ile parametreleri tahmin etmek; birden fazla uyum iyiliği istatistiği hesaplamak; artık değerleri incelemek; parametre kararlılığını karşılaştırmak ve seçilen modeli bağımsız veriler veya ayrı bir deneysel koşul kullanarak doğrulamak. Bu yaklaşım, yalnızca en yüksek R² değerine sahip eşitliği seçmekten daha savunulabilir.

5. İnce Tabaka Modellerinin İstatistiksel Değerlendirilmesi

Yaygın değerlendirme istatistikleri arasında determinasyon katsayısı (R^2), kök ortalama kare hata (RMSE), indirgenmiş ki-kare (χ^2), ortalama mutlak veya göreceli hata ölçütleri ve tahmin standart hatası bulunur. Genel olarak daha yüksek R^2 ve daha düşük hata istatistikleri, tahmin edilen ve gözlenen değerler arasındaki daha yakın uyumu gösterir.

Bununla birlikte bu istatistikler birbirinin yerine kullanılamaz ve diğer istatistikler dikkate alınmadan tek bir istatistiğe göre model seçilmemelidir.

Kilic (2017) bu açıdan özellikle ilgili bir örnek sunmaktadır. LTHV kurutma çalışmasında deneysel alabalık verilerine 23 matematiksel model uygulanmış ve 14 kriter kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme temel bir metodolojik noktayı ortaya koymaktadır: modellerin sıralaması kullanılan kritere bağlı olabilir. R^2 açısından çekici görünen bir model RMSE veya χ^2 değerini en aza indirmeyebilir; küçük sayısal hataya sahip bir model ise kararsız parametreler veya zayıf ekstrapolasyon üretebilir.

Kilic (2025), bu metodolojik yaklaşımı ince tabaka yöntemiyle soğukta kurutulmuş gıdalara genişleterek yaygın matematiksel modellerle kullanılan istatistiksel kriterleri kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Çalışma, kurutma hızlarının yavaş olduğu ve işlemler arasındaki deneysel farklılıkların nispeten küçük kaldığı düşük sıcaklıkta gıda kurutması açısından özellikle önemlidir. Bu durumlarda ölçüm hassasiyeti, örnekleme sıklığı, parametre belirsizliği ve istatistiksel metriğin seçimi önem kazanır.

Ek bir sorun aşırı uyumdur. Model parametrelerinin sayısı arttıkça model, temel kurutma davranışı yerine deneysel gürültüyü temsil edebilir. Bu problem özellikle gözlem sayısının nispeten az olduğu çalışmalarda önemlidir. İstatistiksel olarak üstün bir uyum, bilimsel açıdan daha yararlı bir model anlamına gelmez. Buzrul (2022) de keyfi model seçiminden ve gereksiz karmaşıklıktan kaçınılması gerektiğini vurgulamıştır.

Bu nedenle artık analizi sayısal kriterleri tamamlamalıdır. Artıklar zamana ve tahmin edilen MR'ye göre incelenmelidir. Sistemik örüntüler modelin yanlış tanımlandığını gösterebilirken, sıfır çevresinde rastgele dağılan artıklar yeterli bir eğri temsiline daha güçlü göstergesidir. Özellikle modeller sıcaklık veya hava hızı koşulları arasında karşılaştırıldığında parametrelerin güven aralıkları da bilgilendiricidir.

6. GIDA KURUTMASINDA YENİ İNCE TABAKA UYGULAMALARI

6.1. Düşük sıcaklıkta ve yüksek hızlı kurutma

Kilic'in LTHV kurutma konusundaki ilk çalışmaları, ince tabaka gıda işlemesi için pratik bir yön ortaya koymuştur: kurutma hızını artırmak için temel olarak daha yüksek sıcaklıklara güvenmek yerine dış kütle transferi yüksek hava hızıyla yoğunlaştırılabilir. 2009 yılında Journal of Food Engineering'de yayımlanan çalışmada tuzlanmış gökkuşağı alabalığı tek tabaka halinde 4, 10, 15 ve 20 °C'de, 7 m/s hava hızı ve yaklaşık %40–50 bağıl nem

koşullarında kurutulmuştur (Kilic, 2009). Çalışmada nem içeriği, boyutsuz kütle kaybı, kurutma hızı, kurutma süresi ve kurutma sıcaklığı değerlendirilmiştir.

Bu yaklaşımın önemi hem teknolojik hem de bilimseldir. Düşük sıcaklıkta kurutma, ısıya duyarlı bileşenler üzerindeki termal stresi azaltabilir; yüksek hava hızı ise dış taşınımı artırarak düşük sıcaklığın etkisini en azından kısmen telafi edebilir. Bu durum LTHV'yi renk, tekstür, lipid stabilitesi veya biyoaktif bileşiklerin önemli olduğu kas gıdaları ve fonksiyonel bileşenler açısından özellikle ilgili hale getirmektedir.

6.2. Sürdürülebilirlik ve balık kurutma uygulamaları

Kilic, Midilli ve Dincer (2010), çevresel performans, kalite ve sürdürülebilirliği vurgulayan yeni bir balık kurutma tekniği sunmuştur. Bu çalışma kurutmayı yalnızca bir muhafaza işlemi olarak değil, aynı zamanda bir enerji ve çevre mühendisliği problemi olarak ele almıştır. Kurutmanın enerji gereksiniminin önemli olabilmesi ve endüstriyel kurutmanın kapasite, ürün kalitesi ve kaynak kullanımı arasında denge kurması gerektiği düşünüldüğünde bu bakış açısı giderek daha önemli hale gelmektedir.

LTHV yaklaşımı Kilic'in 2017 tarihli matematiksel modelleme çalışmasıyla daha da geliştirilmiştir. Deneysel kurutma ile çok kriterli model değerlendirmesinin birleştirilmesi, bir kurutma eğrisinin öngörücü proses bilgisine dönüştürülmesi için yararlı bir çerçeve oluşturmuştur. Aynı araştırma çizgisinde hamsinin LTHV kurutulmasına ilişkin bir çalışma yürütülmüş ve daha sonra akışkan yataklı sistemler ile biyoaktif gıda materyallerine doğru genişleme sağlanmıştır.

6.3. İnce tabaka modeli derlemesi ve metodolojik katkı

Kucuk ve ark. (2014), Aydın Kilic'in ortak yazar olduğu ve model seçimi probleminin yapısını sistematik biçimde inceleyen çalışma olması nedeniyle ince tabaka kurutma üzerine bir bölüm açısından doğrudan ilgili yayınlardan biridir. Yazarlar 67 eşitliği incelemiş ve ürün ile proses değişkenleri kapsamında 28 performans kriterini değerlendirmiştir. Derleme ayrıca kurutma eşitliklerinin kullanımındaki güçlük ve tutarsızlıklara dikkat çekmiştir.

Bu katkı özellikle değerlidir; çünkü her yeni veri setini yeni bir model önerme gerekçesi olarak görmek yerine araştırmacıları eşitlik biçimlerini ve değerlendirme uygulamalarını standartlaştırmaya teşvik etmektedir.

6.4. Akışkan yataklı ve düşük sıcaklıklı uygulamalar

Kilic (2020), biyoaktif bir gıda bileşeni olan arı polenin düşük sıcaklık ve yüksek hız destekli akışkan yatakta kurutma karakteristiklerini bildirmiş ve düşük sıcaklık felsefesini tek tabakalı balık kurutmasından partiküler bir biyoaktif gıda bileşenine taşımıştır. Akışkan yataklar güçlü gaz-katı teması ve nispeten yüksek transfer hızları sağlayabilir; ancak partikül boyut dağılımı, sürüklenme, aşınma, yatak hidrodinamiği ve homojen olmayan koşullar dikkate alınmalıdır.

Bu çalışma, ince tabaka kavramlarının daha karmaşık kurutma teknolojilerinin karakterizasyonuna nasıl katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Kilic'in yayınları ayrıca 2020 yılında gıda teknolojisinde yeni düşük sıcaklık ve akışkan yatak uygulamalarına ilişkin bir tartışmayı ve kas gıdalarında LTHV kurutma ile çevre dostu gıda işleme teknolojilerini ele alan kitap bölümlerini içermektedir. Birlikte değerlendirildiğinde bu yayınlar, laboratuvar ölçeğindeki kurutma kinetiğinden proses mühendisliği, kalite korunması ve sürdürülebilirliğe doğru bir ilerlemeyi göstermektedir.

7. Kurutma Kalitesi: Kurutma Eğrisinin Ötesinde

İnce tabaka modeli nem uzaklaştırılmasını tanımlar; ancak gıda kalitesi bağımsız olarak değerlendirilmelidir. Kurutma; pigment bozulması ve enzimatik olmayan esmerleşme yoluyla rengi, hücre duvarının çökmesi ve protein değişimleri yoluyla tekstürü, uçucu bileşiklerin kaybı yoluyla aromayı, oksidasyon yoluyla lipid stabilitesini ve termal veya oksidatif bozulma yoluyla besinsel kaliteyi değiştirebilir. Dolayısıyla kurutma süresini en aza indiren bir proses, toplam ürün kalitesini en üst düzeye çıkarmayabilir.

Balık ve diğer kas gıdalarında kalite değerlendirmesi; nem içeriği, su aktivitesi, pH, tuz içeriği, lipid oksidasyonu göstergeleri, protein özellikleri, renk, tekstür, duyu özellikler ve mikrobiyolojik stabiliteyi içerebilir. Kilic'in LTHV balık kurutma çalışmaları önemlidir; çünkü düşük sıcaklık yaklaşımı yalnızca kinetik nedenlerle değil, aynı zamanda balık kalitesinin korunması amacıyla geliştirilmiştir (Kilic, 2009, 2017).

Arı poleni gibi biyoaktif gıdalarda bu zorluk daha da belirgindir. Ürün, sıcaklık geçmişinin kritik olabileceği ısıya duyarlı bileşikler, pigmentler, enzimler, lipitler, proteinler ve diğer bileşenleri içerir. Bu nedenle düşük sıcaklıklı akışkan yataklı kurutma, yüksek konvektif yoğunluğun azaltılmış termal maruziyetle birleştirildiği bir proses seçeneği sunar (Kilic, 2020).

Dolayısıyla uygun amaç çok boyutludur: kurutma süresi, enerji tüketimi, son nem, su aktivitesi ve kalite özellikleri eş zamanlı olarak dikkate alınmalıdır. Yanıt yüzey metodolojisi, genetik algoritmalar, yapay sinir ağları ve çok amaçlı optimizasyon gibi optimizasyon yöntemleri, temel deneysel verilerin yeterince sağlam olması koşuluyla ince tabaka modelleriyle bütünleştirilebilir.

8. Etkin Nem Difüzivitesi ve Aktivasyon Enerjisi

Etkin nem difüzivitesi ($Deff$) yaygın olarak Fick difüzyon yaklaşımlarından yararlanılarak tahmin edilir. Levha benzeri bir ürün için basitleştirici kabuller altında uzun süreli çözüm, $\ln(MR)$ ile kurutma süresini ilişkilendirecek şekilde dönüştürülebilir. Eğim daha sonra etkin difüzivitenin tahmininde kullanılabilir. Bu tür değerler materyallerin veya işlemlerin karşılaştırılması için yararlıdır; ancak gıda kurutması birden fazla taşınım mekanizmasını içerdiğinden doğrudan moleküler difüzyon katsayısı olarak yorumlanmamalıdır.

Aktivasyon enerjisi çoğunlukla $Deff$ 'in sıcaklıkla ilişkisini Arrhenius tipi bir eşitlik üzerinden kurarak tahmin edilir. Genel biçimde:

$$Deff = D_0 \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

burada D_0 üstel öncesi faktör, E_a görünür aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Basitleştirilmiş kurutma verilerinden elde edildiğinde E_a , prosese bağlı bir parametre olarak tanımlanmalı ve görünür veya etkin bir parametre olduğu belirtilmelidir.

İnce tabaka gıda kurutmasına ilişkin derlemeler, gıdalar arasında etkin difüzyon ve aktivasyon enerjisi için geniş aralıklar bildirmektedir. Bu durum bileşim, yapı, sıcaklık aralığı ve metodolojideki farklılıkları yansıtmaktadır (Erbay ve Icier, 2010; Kutlu ve ark., 2015). Önemli olarak, $Deff$ ve E_a kullanımı ampirik model değerlendirmesini tamamlamalı, onun yerini almamalıdır. Matematiksel olarak mükemmel bir eğri uyumu, Fick difüzyonu varsayımının geçerli olduğunu otomatik olarak kanıtlamaz.

9. İNCE TABAKA KURUTMA ÇALIŞMALARINDA YAYGIN SORUNLAR

9.1. Yetersiz deneysel ayrıntıların raporlanması

Birçok kurutma çalışması, temel çalışma değişkenlerinin belirtilmemesi nedeniyle tekrarlanabilirlik açısından sorun yaşar. Bir yayında en azından başlangıç nem içeriği ve temeli, numune boyutları, numune kütlesi, tabaka kalınlığı, yükleme yoğunluğu, hava sıcaklığı, bağıl nem, hava hızı, kurutucu konfigürasyonu, ölçüm aralığı, sonlandırma kriteri ve nem tayin yöntemi raporlanmalıdır.

9.2. Tek seçim kriteri olarak R^2 kullanılması

R^2 'nin temel kriter olarak yaygın biçimde kullanılması yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Birçok doğrusal olmayan model yüksek R^2 değerlerine ulaşabildiğinden, farklılıklar bir modeli evrensel olarak üstün ilan etmeyi haklı çıkaracak kadar büyük olmayabilir. Birden fazla kriter, artık analizi, parametre belirsizliği ve bağımsız doğrulama daha güçlü kanıt sağlar (Kucuk ve ark., 2014; Kilic, 2017, 2025; Buzrul, 2022).

9.3. Farklı tanımlara sahip eşitliklerin karşılaştırılması

Aynı model adı literatürde farklı cebirsel biçimlerde kullanılabilir. Parametre tanımları da değişebilir. Bu durum çalışmalar arasındaki sonuçların karşılaştırılmasında sorun yaratır. Kucuk ve ark. (2014), kurutma eğrisi eşitliklerinin uygulanmasındaki güçlükleri özellikle belirlemiş ve yerleşik literatür kurallarıyla uyumlu biçimlerin kullanılmasını önermiştir.

9.4. Aşırı sayıda model kullanılması

Onlarca modelin test edilmesi metodolojik bir çalışmada bilgilendirici olabilir; ancak fiziksel anlam dikkate alınmadan en iyi istatistiğe sahip modelin raporlandığı mekanik bir uygulamaya da dönüşebilir. Rutin deneysel çalışmalar için bilimsel olarak gereksinimlenmiş

daha küçük bir model seti tercih edilebilir. Çok sayıda model değerlendiriliyorsa seçim protokolü nihai sıralamalara bakılmadan önce tanımlanmalıdır.

9.5. Doğrulamanın yapılmaması

Bir sıcaklık aralığında uyumlandırılan bir model, otomatik olarak başka bir sıcaklık aralığını tahmin etmek için kullanılmamalıdır. Tahmin amaçlanıyorsa dış doğrulama, çapraz doğrulama veya bağımsız deneysel koşullar gereklidir. Bu durum özellikle kurutucunun ölçek büyütülmesi ve endüstriyel kontrol açısından önemlidir.

10. YENİ YÖNELİMLER VE GELECEKTEKİ ARAŞTIRMALAR

İnce tabaka kurutma araştırmalarının bir sonraki aşamasının basit eğri uyumundan bütünleşik proses modellerine doğru ilerlemesi olasıdır. Dijital ölçüm sistemleri yüksek frekansta kütle kaybı verileri sağlayabilirken makine öğrenmesi; sıcaklık, nem, hava hızı, ürün özellikleri ve kalite sonuçları arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri belirleyebilir. Bununla birlikte veri odaklı modeller temel fiziği gizlemek yerine onu tamamlamalıdır.

Düşük sıcaklıkta kurutma bir diğer önemli yönelimdir. Kilic'in LTHV çalışmaları, düşük sıcaklıkta kurutma kapasitesini korumak için yüksek hava hızının kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım ısı pompaları, nem alma, enerji geri kazanımı, yenilenebilir enerji ve kontrollü atmosfer sistemleriyle birleştirilebilir. Teknolojik amaç yalnızca daha düşük sıcaklık değil, kabul edilebilir kütle transfer performansı ve enerji verimliliği korunurken termal yükün azaltılmasıdır.

Hibrit kurutma da umut vericidir. Konvektif kurutma kızılötesi, mikrodalga, ultrason, ozmotik dehidrasyon, vakum veya akışkan yataklı işletmeyle birleştirilebilir. En uygun kombinasyon ürün yapısına ve kalite hedeflerine bağlıdır. İnce tabaka modellemesi, hibrit prosesin her aşamasının değerlendirilmesi için deneysel bir temel oluşturabilir.

Bir diğer önemli yönelim belirsizliği dikkate alan model seçimidir. Gelecekteki çalışmalar yalnızca R^2 'nin tek bir değerini raporlamak yerine parametre güven aralıklarını, tahmin aralıklarını, artık dağılımlarını ve örnekleme sıklığına duyarlılığı raporlamalıdır. Kilic'in 2025 tarihli çalışması, ince tabaka ile soğukta kurutulmuş gıdaların matematiksel modellerinin istatistiksel değerlendirmesine doğrudan odaklanması nedeniyle bu bağlamda özellikle önemlidir.

Son olarak kurutma araştırmaları giderek daha fazla proses düzeyindeki göstergeleri raporlamalıdır. Özgül enerji tüketimi, su uzaklaştırma hızı, ürün verimi, kalite korunumu, karbon yoğunluğu ve ekonomik göstergeler kurutma kinetiğiyle bütünleştirilebilir. Bu yaklaşım ince tabaka çalışmalarını izole eğri uyumu uygulamalarından proses tasarımı ve endüstriyel karar verme açısından kullanılabilecek veri setlerine dönüştürecektir.

11. İNCE TABAKA KURUTMA ÇALIŞMASININ TASARIMI

Titiz bir deneysel program aşağıdaki sırayla düzenlenebilir. İlk olarak ürün ve kalite amacı tanımlanmalıdır. İkinci olarak başlangıç nemi, su aktivitesi, bileşim, geometri ve ön işlem

karakterize edilmelidir. Üçüncü olarak kurutma faktörleri ve bunların deneysel aralıkları belirlenmelidir. Dördüncü olarak ince tabaka konfigürasyonu ve ölçüm protokolü standartlaştırılmalıdır. Beşinci olarak erken ve geç dönemleri yakalayacak yeterli yoğunlukta kurutma eğrileri oluşturulmalıdır. Altıncı olarak MR açıkça belirtilen bir eşitlikle hesaplanmalıdır. Yedinci olarak sınırlı fakat temsili bir model seti uyumlandırılmalıdır. Sekizinci olarak modeller birden fazla istatistiksel kriter ve artık analizi ile değerlendirilmelidir. Dokuzuncu olarak seçilen model bağımsız bir koşul altında doğrulanmalıdır. Onuncu olarak kinetik model kalite, enerji ve ölçek büyütme hususlarıyla ilişkilendirilmelidir.

Düşük sıcaklık çalışmalarında ölçüm hassasiyetine özel dikkat gösterilmelidir. Kurutma yavaş olduğunda ardışık gözlemler arasındaki kütle değişimleri küçük olabilir ve terazinin çözünürlüğü önemli bir belirsizlik kaynağı haline gelebilir. Bağlı nem de dikkatle kontrol edilmelidir; çünkü nem itici gücündeki küçük bir değişim kurutmayı etkileyebilir. Bu hususlar özellikle soğutma sıcaklıklarına yakın çalışan soğuk hava sistemlerinde önem kazanır.

Akışkan yataklı uygulamalarda ince tabaka kavramı yatak hidrodinamiği ve partikül davranışı ile tamamlanmalıdır. Hava hızı akışkanlaşmayı sağlayacak kadar yüksek olmalı, ancak ürün kaybı, aşınma veya aşırı basınç düşümünün sorun oluşturacağı kadar yüksek olmamalıdır. Arı poleni gibi düzensiz ürünlerde partikül boyut dağılımı belgelenmelidir; çünkü farklı partiküller farklı yerel taşınım koşullarına maruz kalabilir.

Balık için geometri, tuzlama, lipid içeriği ve kas yapısı açıkça dikkate alınmalıdır. Tuzlanmış ürünler, tuzlanmamış materyallerden önemli ölçüde farklı nem taşınım özelliklerine sahip olabilir. Kalite son noktaları yalnızca son nemi değil, uygun olduğunda su aktivitesi, tekstür, renk, lipid oksidasyonu ve duyu kabul edilebilirliği de içermelidir.

12. SONUÇ

İnce tabaka kurutma, nem kaybı ölçümleri ile proses mühendisliği arasında pratik bir bağlantı sağlaması nedeniyle gıda teknolojisinde temel bir deneysel ve modelleme aracı olmaya devam etmektedir. Değeri, her gıdanın basit ve homojen bir katı gibi davrandığını varsaymasında değil; standartlaştırılmış kurutma eğrileri üretmesi, bu eğrilerin analiz edilip karşılaştırılabilmesi ve daha geniş proses modellerine dahil edilebilmesinde yatmaktadır.

Literatür, başarılı ince tabaka araştırmalarının sıcaklık, nem, hava hızı, tabaka kalınlığı, geometri, ön işlem ve nem ölçümünün dikkatli biçimde kontrol edilmesini ve raporlanmasını gerektirdiğini göstermektedir. Matematiksel modelleme; model seçim süreci şeffaf, istatistiksel olarak titiz, fiziksel olarak temellendirilmiş ve bağımsız biçimde doğrulanmış olduğunda en yararlı hale gelir. Midilli–Kucuk modeli ve yaygın kullanılan diğer ampirik veya yarı teorik eşitlikler değerli olabilir; ancak hiçbir eşitlik evrensel olarak optimum kabul edilmemelidir.

Aydin Kilic'in araştırmaları bu alana özellikle tutarlı bir katkı sunmaktadır. LTHV balık kurutma çalışmaları düşük sıcaklık ile yüksek hava hızının birleştirilmesinin potansiyelini göstermiş; Kucuk ile 2014 yılında gerçekleştirdiği derleme ince tabaka eşitliklerini sistematik olarak incelemiş; 2017 modelleme çalışması LTHV kurutma verilerinin çok kriterli değerlendirilmesini göstermiş; akışkan yatak çalışmaları düşük sıcaklıklı işlemeyi biyoaktif

gıdalara genişletmiş ve 2025 çalışması ince tabaka ile soğukta kurutma modellerinin istatistiksel kriterlerini kapsamlı biçimde inceleyerek metodolojik temele geri dönmüştür (Kilic, 2009, 2017, 2020, 2025; Kucuk ve ark., 2014).

Gelecekteki araştırmalar kurutma kinetiğini kalite, enerji, sürdürülebilirlik ve belirsizlik ile bütünleştirmelidir. Böyle bir yaklaşım, ince tabaka deneylerinin bilimsel faydasını güçlendirecek ve bunların endüstriyel kurutucu tasarımı, optimizasyonu ve kontrolündeki değerini artıracaktır.

KAYNAKÇA

- Buzrul, S. (2022). Reassessment of thin-layer drying models for foods: A critical short communication. *Processes*, 10(1), 118. doi:10.3390/pr10010118
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. doi:10.1080/10408390802437063
- Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2017). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(4), 701–717. doi:10.1080/10408398.2014.910493
- Kilic, A. (2009). Low temperature and high velocity (LTHV) application in drying: Characteristics and effects on the fish quality. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 173–182. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.08.023
- Kilic, A. (2011). Low temperature high velocity drying (LTHV) applications in muscle foods. In D. A. Medina & A. M. Laine (Eds.), *Food quality control analysis and consumer concerns* (pp. 359–386). Nova Science Publishers.
- Kilic, A. (2017a). LTHV (low temperature and high velocity) drying characteristics and mathematical modeling of anchovy (*Engraulis encrasicolus*). *GIDA / The Journal of Food*, 42(6), 654–665.
- Kilic, A. (2017b). Mathematical modeling of low temperature high velocity (LTHV) drying in foods. *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), e12378. doi:10.1111/jfpe.12378
- Kilic, A. (2020a). Low temperature and high velocity assisted fluidized bed drying characteristics of bee pollen as bioactive food. *Journal of Food Process Engineering*, 43(8).
- Kilic, A. (2020b). Novel low temperature and fluidized bed applications in food technology. *Journal of Food Processing & Technology*, 11(1).
- Kilic, A. (2022). Novel cold process applications for the preservation of bioactive components of several natural functional foods. In *Studies in natural products chemistry* (pp. 295–328). Elsevier.
- Kilic, A. (2025). Comprehensive evaluation of mathematical models used in the thin-layer cold dried foods. *Food Science & Nutrition*, 13(7), e70558. doi:10.1002/fsn3.70558
- Kilic, A., Midilli, A., & Dincer, I. (2010). A novel fish-drying technique for better environment, quality and sustainability. *International Journal of Global Warming*, 2(3), 262–278.
- Kucuk, H., Kilic, A., & Midilli, A. (2014). Common applications of thin layer drying curve equations and their evaluation criteria. In *Progress in exergy, energy, and the environment* (pp. 669–680). Springer.

- Kucuk, H., Midilli, A., Kilic, A., & Dincer, I. (2014). A review on thin-layer drying-curve equations. *Drying Technology*, 32(7), 757–773. doi:10.1080/07373937.2013.873047
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513. doi:10.1081/DRT-120005864
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599–618. doi:10.1111/1541-4337.12196
- <https://chatgpt.com/c/6ab836f2-eacc-83eb-b41f-6be0d3ac4c52>

BÖLÜM 3

GIDA BİYOTEKNOLOJİSİNDE POSTBİYOTİKLER: ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ, BİYOLOJİK AKTİVİTELERİ VE GIDA UYGULAMALARI

Özgül YAZAR¹

¹ Arş. Gör. Dr. Özgül Yazar, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Gıda Bili-mi Anabilim Dalı, Tokat, Türkiye. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5154-3193> E-posta: ozgul.guzel@gop.edu.tr

1. GİRİŞ

Sağlıklı beslenmeye yönelik tüketici farkındalığının artması, temel beslenme gereksinimlerinin ötesinde sağlık yararları sunabilen fonksiyonel gıdalara ilgiyi artırmaktadır. Fonksiyonel gıdalar, besleyici özelliklerinin yanı sıra fizyolojik işlevleri destekleyebilen veya hastalık gelişme riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilen gıdalar olarak tanımlanmaktadır (Shandilya ve Sharma, 2017; Vignesh ve ark., 2024). İlk olarak 1980'li yıllarda Japonya'da gelişen bu kavram, 1991 yılında FOSHU sistemiyle düzenleyici bir çerçeve kazanmıştır (Kara, 2024). Gıda biyoteknolojisindeki gelişmeler ise fonksiyonel bileşenlerin çeşitlendirilmesine ve gıda sistemlerinde kullanımına yönelik araştırmaları hızlandırmıştır.

Fermentasyon, gıdaların besinsel, duyuşal ve teknolojik özelliklerini geliştiren önemli biyoteknolojik süreçlerden biridir. Laktik asit bakterileri ve mayalar gibi mikroorganizmaların faaliyetleri sonucunda organik asitler, peptitler, ekzopolisakkaritler ve çeşitli biyoaktif bileşenler oluşabilmektedir (Yücel Şengün, 2011). Fermentasyon teknolojilerindeki gelişmeler, canlı mikroorganizmaların yanı sıra inaktive hücrelerin ve hücresel bileşenlerin kullanımını da gündeme getirmiştir.

Probiyotikler, yeterli miktarda uygulandıklarında konakçıya sağlık yararı sağlayan canlı mikroorganizmalar olarak tanımlanmaktadır (FAO, 2002; Geçgin, 2024). Ancak etkinliklerinin suş ve konakçı özelliklerine bağlı değişmesi, üretim ve depolama sırasında canlılığın korunmasındaki güçlükler ve hassas bireylerdeki güvenlik kaygıları kullanımlarını sınırlandırabilmektedir (Liang ve ark., 2024). Bu sınırlılıklar, canlı mikroorganizmalara alternatif mikrobiyal preparatlara yönelik ilgiyi artırmıştır.

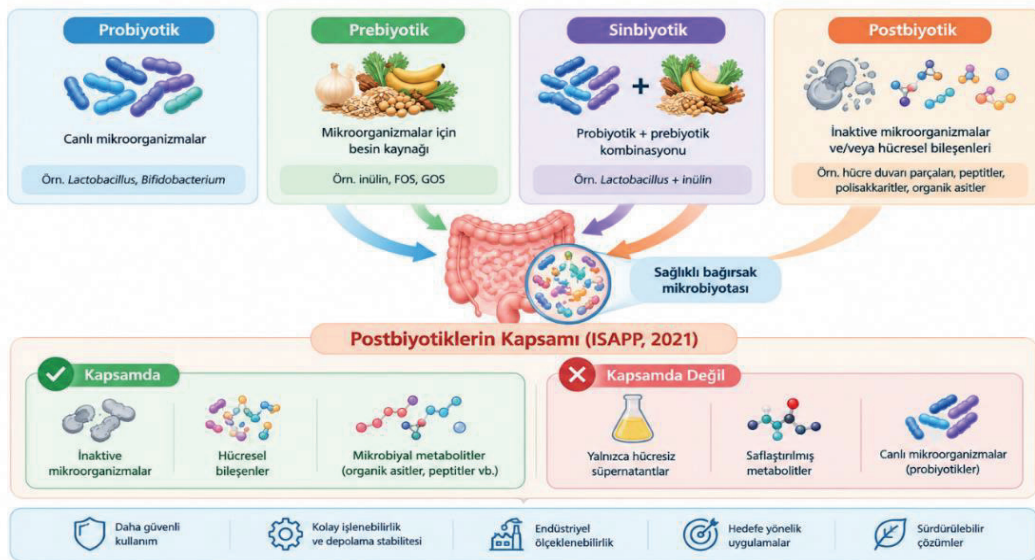
Bu kapsamda postbiyotikler, gıda biyoteknolojisinde önem kazanan fonksiyonel bileşenlerdir. Uluslararası Probiyotikler ve Prebiyotikler Bilimsel Birliği (ISAPP) uzlaşısı tanımına göre postbiyotikler, konakçıya sağlık yararı sağlayan inaktive mikroorganizmaları ve/veya bunların bileşenlerini içeren preparatlardır. Hücre duvarı ve zar bileşenleri bu kapsamda değerlendirilebilirken saflaştırılmış mikrobiyal metabolitler tek başlarına postbiyotik olarak kabul edilmemektedir (Vinderola ve ark., 2024). Canlı mikroorganizma içermemeleri, postbiyotiklere depolama stabilitesi açısından bazı avantajlar sağlayabilmekle birlikte biyolojik etkinlik ve güvenlikleri preparata özgü olarak değerlendirilmelidir.

Postbiyotiklerin bileşimi ve fonksiyonel özellikleri; mikrobiyal suş, fermentasyon koşulları ve inaktivasyon yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle üretim standardizasyonu, etkinlik ve güvenlik değerlendirmeleri ile gıda matrislerine uyumluluklarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu kitap bölümünde postbiyotiklerin tanımı, mikrobiyal kaynakları,

üretim teknolojileri, biyolojik aktiviteleri, gıda uygulamaları ve düzenleyici gereklilikleri ele alınmaktadır.

2. Postbiyotik Tanımı ve Sınıflandırılması

Bağırsak mikrobiyotası ve konakçı sağlığıyla ilişkili biyotik yaklaşımlar; probiyotikler, prebiyotikler, sinbiyotikler ve postbiyotikler kapsamaktadır. Probiyotikler sağlık yararı sağlayan canlı mikroorganizmaları, prebiyotikler konakçı mikroorganizmaları tarafından seçici olarak kullanılan yararlı substratları, sinbiyotikler ise canlı mikroorganizmalar ile bu substratların sağlık yararı sağlayan kombinasyonlarını ifade etmektedir. Postbiyotikler ise canlı olmayan mikroorganizmaları ve/veya bunların bileşenlerini içeren, sağlık yararı gösterilmiş preparatlardır (Hill ve ark., 2014; Gibson ve ark., 2017; Swanson ve ark., 2020). Bu kavramlar Şekil 1’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Probiyotik, prebiyotik, sinbiyotik ve postbiyotik kavramlarının karşılaştırılması ve postbiyotiklerin ISAPP uzlaşısı tanımı doğrultusunda kapsamının şematik gösterimi (Hill ve ark., 2014; Gibson ve ark., 2017; Swanson ve ark., 2020; Salminen ve ark., 2021 esas alınarak hazırlanmıştır.).

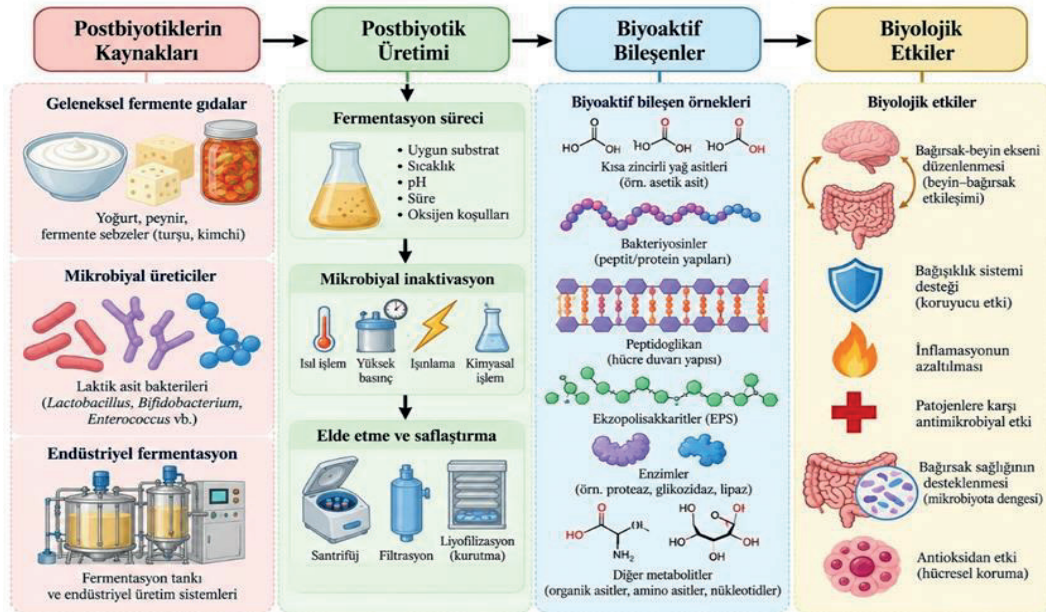
Literatürde postbiyotiklerin tanımlanmasında metabiyotik, paraprobiyotik, biyojenik ve bakteriyel lizat gibi farklı terimler kullanılmış; bazı çalışmalarda mikrobiyal metabolitler ve hücresiz süpernatantlar da postbiyotik olarak değerlendirilmiştir (Moradi ve ark., 2019; Gökırmaklı ve Üçgöl, 2021). Terminolojik farklılıkları gidermek amacıyla ISAPP tarafından 2021 yılında oluşturulan uzlaşısı tanımına göre postbiyotikler, konakçıya sağlık yararı sağlayan inaktive mikroorganizmaları ve/veya bunların bileşenlerini içeren preparatlardır. Bu preparatlar bütün hâlde inaktive hücreleri, hücre duvarı ve zarı bileşenlerini içerebilirken

saflaştırılmış metabolitler ve yalnızca hücresiz süpernatantlar tek başlarına postbiyotik kabul edilmemektedir. Ayrıca kullanılan mikroorganizmaların önceden probiyotik olarak tanımlanması zorunlu değildir (Vinderola ve ark., 2024).

Postbiyotiklerin tanımlanabilmesi için mikrobiyal inaktivasyonun yanı sıra konakçıya sağlık yararının bilimsel olarak gösterilmesi gerekmektedir (Salminen ve ark., 2021). Canlı mikroorganizma içermemeleri, bazı uygulamalarda güvenlik ve depolama stabilitesi açısından avantaj sağlayabilmekle birlikte bu özellikler mikrobiyal suşa, üretim yöntemine ve preparatın bileşimine bağlı olarak değerlendirilmelidir.

3. Postbiyotiklerin Mikrobiyal Kaynakları ve Üretim Teknolojileri

Postbiyotiklerin bileşimi ve biyolojik işlevselliği, üretimde kullanılan mikrobiyal suşların özelliklerine ve uygulanan üretim koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Postbiyotik üretimi genel olarak uygun mikroorganizmaların seçilmesi, kontrollü fermentasyon koşullarında çoğaltılması, inaktivasyon işlemlerinin uygulanması ve elde edilen preparatların kullanım amacına uygun şekilde işlenmesi aşamalarını kapsamaktadır. İnaktivasyon sonrasında santrifüjleme, filtrasyon, püskürtmeli kurutma ve enkapsülasyon gibi teknolojiler, preparatın bileşimine ve hedeflenen ürün özelliklerine göre kullanılabilir (Mafe ve ark., 2026). Bu süreçlerde kullanılan yöntemlerin standardizasyonu ve son ürünün karakterizasyonu, postbiyotiklerin güvenliği, stabilitesi ve biyolojik etkinliğinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.



Şekil 2. Postbiyotiklerin başlıca kaynakları, üretim aşamaları, biyoaktif bileşenleri ve potansiyel biyolojik etkilerinin şematik gösterimi. Postbiyotik üretiminde kullanılan mikrobiyal kaynaklar, fermentasyon ve inaktivasyon süreçleri ile elde etme ve saflaştırma

işlemleri özetlenmiştir. Ayrıca postbiyotik preparatlarıyla ilişkili başlıca bileşenler ve bunların antimikrobiyal, antioksidan, antiinflamatuvar, immünomodülatör ve bağırsak sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri gösterilmiştir (Mafe ve ark., 2026; Salminen ve ark., 2021'den yararlanılarak hazırlanmıştır).

3.1. Postbiyotik üretiminde kullanılan mikroorganizmalar

Postbiyotik üretiminde başlıca laktik asit bakterileri, bifidobakteriler ve propiyonik asit bakterileri araştırılmakla birlikte, probiyotik olarak tanımlanmamış mikroorganizmalar da potansiyel kaynaklar arasında yer almaktadır. Ancak suş düzeyinde güvenliğin değerlendirilmesi, inaktivasyonun doğrulanması ve elde edilen preparatın sağlık yararının gösterilmesi gerekmektedir (Foo ve ark., 2019).

Laktik asit bakterilerinden *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus rhamnosus* ve *Lacticaseibacillus casei* ile çeşitli *Bifidobacterium* türleri, hücresel bileşenleri ve biyolojik aktiviteleri bakımından yaygın olarak incelenmektedir (Hakim ve ark., 2023). Ayrıca *Propionibacterium freudenreichii*, *Bacillus* spp. ve *Enterococcus faecium* gibi mikroorganizmalar da potansiyel kaynaklar arasında değerlendirilmektedir (Chen ve ark., 2023; Zabodyova ve ark., 2024). Bununla birlikte, özellikle *Bacillus* ve *Enterococcus* türlerinde suşa özgü güvenlik riskleri dikkate alınmalıdır.

Mikrobiyal kaynak seçiminde metabolit üretim kapasitesinin yanı sıra inaktivasyon sonrasında korunan hücresel bileşenler, biyolojik etkinlik ve preparat stabilitesi birlikte değerlendirilmelidir. Bu özelliklerin üretim koşullarından etkilenmesi, süreçlerin standardizasyonunu gerekli kılmaktadır.

3.2. Fermentasyon ve üretim koşulları

Postbiyotik üretiminde fermentasyon koşulları, mikrobiyal gelişimi ve elde edilen preparatların bileşimini ve biyolojik aktivitelerini etkileyen temel faktörlerdir. Kullanılan mikroorganizma, besiyerinin karbon ve azot kaynakları, sıcaklık, pH ve inkübasyon süresi üretim verimliliğini belirlemektedir. Ayrıca karma kültür fermentasyonları, farklı mikrobiyal bileşenlerin elde edilmesine olanak sağlayabilmektedir (Saez ve ark., 2025; Yuan ve ark., 2024).

Besiyeri bileşiminin önemini inceleyen Garrote Achou ve ark. (2025), farklı karbon ve azot kaynaklarının laktik asit bakterilerinin gelişimini ve *Escherichia coli*'ye karşı antimikrobiyal aktivitelerini etkilediğini bildirmiştir. Benzer şekilde Amiri ve ark. (2021), *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* BB12 ile gerçekleştirdikleri optimizasyon çalışmasında sıcaklık ve inkübasyon süresinin biyoaktif bileşenlerin üretiminde önemli olduğunu belirlemiştir.

Fermentasyon süresi ve sonrasında uygulanan ısıl işlemler de preparatların fonksiyonel özelliklerini değiştirebilmektedir. Asefa ve ark. (2026), karma kültür fermentasyonunda 48 saatlik fermentasyon ve ısıl işlem koşullarının ürün verimi ve antimikrobiyal aktivite açısından olumlu sonuçlar verdiğini bildirmiştir. Bununla birlikte, uygun koşullar kullanılan suşa ve hedeflenen preparatın özelliklerine göre değişmektedir.

Postbiyotik üretiminde fermentasyon parametrelerinin preparata özgü optimize edilmesi ve standardize edilmesi, biyolojik aktivitenin korunması, ürün kalitesi ve endüstriyel ölçekte tekrarlanabilir üretim açısından önem taşımaktadır (Zhong ve ark., 2024; Hijová, 2024).

3.3. İnaktivasyon ve hücre parçalama teknolojileri

Postbiyotik üretiminde mikrobiyal hücrelerin inaktivasyonu ve hücresel bileşenlerin açığa çıkarılması amacıyla ısıl, ısıl olmayan ve enzimatik yöntemlerden yararlanılmaktadır. Yöntem seçimi, mikroorganizmanın özelliklerine, hedeflenen bileşenlere ve biyolojik aktivitenin korunmasına bağlıdır (Salminen ve ark., 2021).

Isıl inaktivasyonda yaygın kullanılan pastörizasyon ve otoklavlama, hücresel proteinlerin denatürasyonu ve zar bütünlüğünün bozulması yoluyla mikrobiyal canlılığı ortadan kaldırmaktadır. Ancak yüksek sıcaklıklar, ısıya duyarlı bileşenlerin yapısını ve biyolojik aktivitesini değiştirebilmektedir (Aguilar-Toalá ve ark., 2018).

Isıl olmayan teknolojilerden yüksek hidrostatik basınç (HPP), hücre zarı ve protein yapılarında değişikliklere neden olurken darbeli elektrik alan (PEF), elektroporasyon yoluyla hücre zarı geçirgenliğini artırmakta ve uygun koşullarda inaktivasyon sağlayabilmektedir. Soğuk atmosferik plazma, reaktif oksijen ve azot türlerinin etkisiyle; süperkritik karbondioksit (scCO₂) ise hücresel yapılara nüfuz etme ve hücre içi ortamı asitleştirme yoluyla mikrobiyal canlılığı etkileyebilmektedir. Bu yöntemler, belirli koşullarda ısıya duyarlı bileşenlerin korunması açısından alternatif oluşturmaktadır (Balakrishna ve ark., 2026).

Hücre parçalama yöntemlerinden ultrasonikasyon, akustik kavitasyonla oluşan mekanik kuvvetler aracılığıyla hücresel bileşenlerin serbest bırakılmasını sağlamaktadır (Aruwa ve ark., 2022). Enzimatik yöntemlerde ise lizozim ve proteolitik enzimler kullanılarak hücresel yapıların parçalanması amaçlanmaktadır. Ancak hücre parçalanması, tam inaktivasyon sağlandığı anlamına gelmemektedir. İnaktivasyonun etkinliği, uygun kültüre dayalı canlılık testleriyle doğrulanmalıdır. Akış sitometrisi, qPCR ve dPCR gibi yöntemler hücresel özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılabilirle birlikte, DNA varlığı tek başına canlılık göstergesi değildir. Bu nedenle yöntemlerin uygun analizlerle desteklenmesi, ürün güvenliği ve üretim standardizasyonu açısından önemlidir (Zhu ve ark., 2025).

3.4. Elde etme, stabilizasyon ve karakterizasyon

Postbiyotik üretiminde fermentasyon ve inaktivasyonu izleyen elde etme ve stabilizasyon aşamalarında santrifüjleme, membran filtrasyonu, liyofilizasyon, püskürtmeli kurutma ve enkapsülasyon gibi yöntemlerden yararlanılmaktadır. Santrifüjleme ve membran filtrasyonu hücresel fraksiyonların ayrılması ve yoğunlaştırılmasını sağlarken, kurutma ve enkapsülasyon işlemleri preparatların stabilitesinin korunmasına yönelik uygulanmaktadır. Yöntem seçimi, hedeflenen bileşime ve biyoaktif bileşenlerin korunmasına bağlıdır (Balakrishna ve ark., 2026).

Postbiyotik preparatların karakterizasyonunda metabolomik, proteomik ve lipidomik analizlerle bileşimleri; partikül boyutu ve yapısal analizlerle fizikokimyasal özellikleri değerlendirilebilmektedir. Antioksidan, antimikrobiyal ve immünomodülatör aktivite analizleri ise fonksiyonel özelliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu analizler, preparatların standardizasyonu, üretim partileri arasındaki değişkenliğin değerlendirilmesi ve tekrarlanabilir üretimin sağlanması açısından önem taşımaktadır (Nataraj ve ark., 2020).

4. Postbiyotiklerin Biyolojik Aktiviteleri

Postbiyotik preparatlarla ilişkili mikrobiyal hücre bileşenleri ve metabolitler, çeşitli biyolojik aktivitelerle ilişkilendirilmektedir. Literatürde bakteriyosinlerin ve bazı hücre yüzeyi bileşenlerinin antimikrobiyal ve patojen adezyonunu sınırlandırıcı etkiler gösterebildiği, laktat ve kısa zincirli yağ asitlerinin ise inflamatuvar süreçlerin modülasyonunda rol oynayabildiği bildirilmektedir. Bunun yanı sıra kefiran gibi ekzopolisakkaritler immünomodülatör etkilerle, ACE inhibitör aktivite gösteren mikrobiyal peptitler ise kan basıncının düzenlenmesiyle ilişkilendirilmektedir. Gama-aminobütirik asit (GABA) gibi mikrobiyal metabolitlerin nörofizyolojik süreçlerle, bazı fosfopeptitlerin ise mineral biyoyararlanımıyla ilişkili olabileceği belirtilmektedir (Collado ve ark., 2019). Bununla birlikte, söz konusu bileşenlerin tek başlarına postbiyotik olarak sınıflandırılması yerine, postbiyotik preparatlarla ilişkili biyoaktif bileşenler olarak değerlendirilmesi güncel terminoloji açısından daha uygundur. Bu bileşenlerin literatürde bildirilen potansiyel biyolojik aktiviteleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

4.1. Antimikrobiyal aktivite

Postbiyotik preparatların antimikrobiyal özellikleri, içerdikleri mikrobiyal bileşenler ve ilişkili metabolitlerle bağlantılı olabilmektedir. Bakteriyosinler hücre zarı bütünlüğünü ve temel hücresel işlevleri etkileyerek, asetat, propiyonat ve bütirat gibi organik asitler ise ortam pH'sını değiştirerek patojen gelişimini baskılayabilmektedir (Simons ve ark., 2020; Mirzaei ve ark., 2022). Ayrıca *Lactobacillus reuteri* kaynaklı reuterin oksidatif stres oluşturabilirken,

ekzopolisakkaritler (EPS) hücresel yapılarla etkileşimleri yoluyla antimikrobiyal aktivite gösterebilmektedir (Johnson ve ark., 2019).

Antimikrobiyal etkinlik, mikrobiyal suşa, fermentasyon koşullarına ve hedef mikroorganizmaya bağlı olarak değişmektedir (Ooi ve ark., 2021). Tong ve ark. (2023), farklı fermentasyon koşullarında elde edilen preparatların *Escherichia coli* üzerindeki inhibitör etkilerinin değiştiğini; Ebrahimi ve ark. (2021), ise *Apilactobacillus kunkeei* kaynaklı preparatların *Candida albicans* üzerinde inhibitör aktivite gösterebildiğini bildirmiştir. Bu bulgular, mikrobiyal kaynaklı preparatların gıdalarda biyokoruma açısından potansiyelini ortaya koymakla birlikte etkinliklerinin gıda matrislerinde doğrulanması gerekmektedir. Bununla birlikte, yalnızca antimikrobiyal metabolit içermesi bir preparatın postbiyotik olarak tanımlanması için yeterli değildir; ISAPP tanımına uygunluk ve konakçıya sağlık yararının gösterilmesi gerekmektedir (Salminen ve ark., 2021).

4.2. Antioksidan aktivite

Postbiyotik preparatların antioksidan aktiviteleri, mikrobiyal kaynaklı enzimler ve diğer biyoaktif bileşenlerle ilişkili olabilmektedir. Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve glutatyon peroksidaz (GPx) gibi enzimler, reaktif oksijen türlerinin etkilerinin azaltılmasında rol oynamaktadır (Wang ve ark., 2018; Alan ve ark., 2022). Farklı mikrobiyal preparatların serbest radikal giderme kapasitesi ve antioksidan savunma mekanizmaları üzerindeki etkileri çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Qiao ve ark., 2024; Yousefvand ve ark., 2024).

Kang ve ark. (2021), ısıtma işlemiyle inaktive edilmiş *Bifidobacterium* kaynaklı preparatlarda yüksek DPPH ve ABTS radikali giderme aktiviteleri belirlerken, Lee ve ark. (2024), *Levilactobacillus brevis* BK3 kaynaklı preparatın antioksidan aktivite gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca Izuddin ve ark. (2020), *Lactiplantibacillus plantarum* kaynaklı preparatların kuzularda glutatyon peroksidaz aktivitesini artırdığını rapor etmiştir. Bununla birlikte, antioksidan etkinlik suşa, preparat bileşimine ve analiz koşullarına bağlı olarak değişmekte olup farklı çalışmaların sonuçları doğrudan karşılaştırılmamalıdır.

4.3. Antiinflamatuvar ve immünomodülatör etkiler

Postbiyotik preparatlar, içerdikleri peptidoglikan, lipoteikoik asit ve hücre yüzeyi proteinleri aracılığıyla bağışıklık yanıtını düzenleyebilmektedir. Bu bileşenlerin Toll-benzeri reseptörler (TLR) ile etkileşimi, NF-κB sinyal yolu ve sitokin üretimini etkileyerek inflamatuvar yanıtları değiştirebilmektedir (Bourebaba ve ark., 2022). Bununla birlikte, etkiler kullanılan suşa ve preparatın özelliklerine bağlı olarak proinflamatuvar veya antiinflamatuvar yönde gelişebilmektedir.

Deneyisel çalışmalarda *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* kaynaklı inaktive preparatların IL-6 ve TNF- α gibi proinflamatuvar sitokinleri azaltabildiği, IL-10 üretimini ise destekleyebildiği bildirilmiştir (Martorell ve ark., 2021). Ayrıca mikrobiyal bileşenlerin B lenfositleri ve mukozal immünoglobulin A (IgA) yanıtıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir (Chorawala ve ark., 2021). Bu bulgular postbiyotiklerin immünomodülatör potansiyelini desteklemekle birlikte, kanıtların önemli bir kısmı *in vitro* ve hayvan çalışmalarına dayandığından insanlarda etkinliğin doğrulanması için kontrollü klinik araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır (Dunand ve ark., 2019).

4.4. Bağırsak bariyeri ve mikrobiyota ile ilişkili etkiler

Postbiyotik preparatlar, bağırsak epitel bütünlüğünün korunması, mukozal bağışıklığın düzenlenmesi ve mikrobiyota fonksiyonlarının desteklenmesiyle ilişkili etkiler gösterebilmektedir (Mazziotta ve ark., 2023). Bazı preparatların okludin, klaudin ve zonula okludens-1 (ZO-1) gibi sıkı bağlantı proteinlerini etkileyerek bağırsak geçirgenliğinin düzenlenmesine katkı sağlayabileceği bildirilmiştir (Li ve ark., 2024).

Bağırsak mikrobiyotasının fermentatif faaliyetleriyle oluşan asetat, propiyonat ve bütirat gibi kısa zincirli yağ asitleri (KZYA), epitel bariyerinin korunması ve inflamatuvar yanıtların düzenlenmesinde rol oynamaktadır (Kim ve ark., 2018). Ancak bu metabolitler tek başlarına postbiyotik olarak değerlendirilmemekte; postbiyotik preparatların bağırsak üzerindeki etkileri kullanılan suşa, preparatın bileşimine ve üretim koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (Salminen ve ark., 2021).

5. Gıda Endüstrisinde Postbiyotik Uygulamaları

Postbiyotik preparatlar, etkinliklerinin mikrobiyal canlılığın korunmasına bağlı olmaması ve bazı preparatların işleme ve depolama koşullarına dayanıklılığı nedeniyle fonksiyonel gıdalarda alternatif bileşenler olarak değerlendirilmektedir. Bu özellikler, üretim ve depolama stabilitesi ile soğuk zincir gereksiniminin azaltılması açısından avantaj sağlayabilmektedir (Aggarwal ve ark., 2022). Bazı preparatların ısıl işlemlere dayanıklılığı, pastörizasyon ve fırınlama gibi işlemlerden geçen gıdalarda kullanım potansiyelini artırmaktadır (Payne ve ark., 2024). Bununla birlikte, gıda matrisiyle etkileşimleri tat, renk ve tekstür özelliklerini etkileyebileceğinden teknolojik stabilite, duyuşal kabul edilebilirlik ve biyolojik etkinlik ürün bazında değerlendirilmelidir (Pham ve ark., 2024; Thorakkattu ve ark., 2022).

Süt ürünleri, fermente sebzeler, soya ve tahıl bazlı gıdalar, mikrobiyal hücrel bileşenler ve metabolitler açısından önemli kaynaklardır (Xiang ve ark., 2019; García-Burgos ve ark., 2020). Bununla birlikte, bu bileşenlerin varlığı ilgili gıdanın doğrudan postbiyotik olarak sınıflandırılması için yeterli değildir.

5.1. Süt ve süt ürünleri

Süt ürünlerinde postbiyotik uygulamaları, özellikle ısıl işlemle inaktive edilmiş laktik asit bakterilerine odaklanmaktadır. *Lactocaseibacillus paracasei* içeren inaktive mikrobiyal preparatlar, süt bazlı fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesinde araştırılmaktadır (Akpoghelie ve ark., 2025; Xia ve ark., 2024). Bebek formüllerinde ise *Bifidobacterium breve* ve *Streptococcus thermophilus* ile fermente edilip ardından inaktive edilen preparatların gastrointestinal tolerans, bağırsak mikrobiyotası ve bağışıklık göstergeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Cristofori ve ark., 2021; Wegh ve ark., 2019). Ayrıca laktik asit bakterilerinden elde edilen antimikrobiyal preparatların peynir ve ekşi krema gibi ürünlerde küf gelişimini baskılama potansiyeli araştırılmıştır (Moradi ve ark., 2019). Ancak bu preparatların postbiyotik tanımına uygunluğu ayrıca değerlendirilmeli; antimikrobiyal etkinlikleri, ürünün duyuusal ve teknolojik özellikleriyle birlikte ele alınmalıdır.

5.2. Et ve su ürünleri

Et ürünlerinde mikrobiyal kaynaklı antimikrobiyal preparatlar, gıda kaynaklı patojenlerin kontrolü ve biyokoruma amacıyla araştırılmaktadır. *Lactocaseibacillus rhamnosus* kaynaklı bir preparatın tavuk kıymasında *Clostridium perfringens* gelişimini engellediği, farklı laktik asit bakterilerinden elde edilen preparatların ise *Listeria monocytogenes* üzerinde inhibitör etki gösterebildiği bildirilmiştir (Sharma ve ark., 2020). Su ürünlerinde de mikrobiyal bozulmanın sınırlandırılması amacıyla benzer yaklaşımlar değerlendirilmektedir. Sharafi ve ark. (2025), *Lactiplantibacillus plantarum* kaynaklı bir preparat ile *Thymus daenensis* uçucu yağ nanoemülsiyonunun birlikte uygulanmasının, 4 °C’de depolanan gökkuşağı alabalığı filetolarının raf ömrünü kontrol grubuna kıyasla üç günden fazla uzattığını bildirmiştir. Bu bulgular, mikrobiyal kaynaklı preparatların et ve su ürünlerinde biyokoruma potansiyelini desteklemekle birlikte, preparatların postbiyotik tanımına uygunluğu, mikrobiyolojik etkinliği ve duyuusal özelliklere etkileri ürün bazında değerlendirilmelidir (Salminen ve ark., 2021).

5.3. Bitkisel gıdalar, tahıl ürünleri ve içecekler

Bitkisel bazlı fonksiyonel içeceklerde postbiyotik preparatların kullanımı araştırılmaktadır. Naderi ve ark. (2026), susam kabuğu kaynaklı oligosakkaritleri farklı laktik asit bakterileriyle fermente edip hücreleri ısıl işlemle inaktive ederek elde ettikleri preparatları arpa maltı bazlı bir içekte değerlendirmiştir. Preparat ilavesinin içeceğin antioksidan aktivitesini yaklaşık %20 artırdığı ve bazı preparatların sindirim enzimleri üzerinde inhibitör aktivite gösterdiği bildirilmiştir. Bulgular, tarımsal yan ürünlerden elde edilen mikrobiyal preparatların fonksiyonel içecek geliştirmede kullanılma potansiyeline işaret etmektedir.

5.4. Aktif ambalajlama ve biyokoruma uygulamaları

Postbiyotik preparatlar ve mikrobiyal kaynaklı antimikrobiyal bileşenler, gıda güvenliğinin desteklenmesi ve raf ömrünün uzatılması amacıyla aktif ambalajlama sistemlerinde araştırılmaktadır. Özellikle nisin, pediyosin ve enterosin gibi bakteriyosinlerin polimerik filmlere ve yenilebilir kaplamalara dahil edilmesiyle antimikrobiyal ambalaj materyalleri geliştirilmektedir (Vilela ve ark., 2018; Meira ve ark., 2017). Ancak saflaştırılmış bakteriyosinler tek başlarına postbiyotik olarak değerlendirilmemektedir (Salminen ve ark., 2021). Ramazanidoroh ve ark. (2025), *Lactiplantibacillus plantarum* A10 kaynaklı antimikrobiyal bileşenler içeren aljinat/kitosan filmlerin *Escherichia coli* ve *Listeria monocytogenes* üzerinde inhibitör etki gösterdiğini ve tavuk filetolarının raf ömrünü kontrol örneklerine kıyasla beş gün uzattığını bildirmiştir. Bu sistemlerin endüstriyel kullanımında antimikrobiyal etkinlik, ambalajın mekanik özellikleri, depolama stabilitesi ve gıda matrisiyle uyumluluğun değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca standardizasyon, güvenlik ve mevzuata ilişkin belirsizlikler önemli uygulama sınırlılıklarıdır (Trymers ve ark., 2026).

6. Gıda Güvenliği ve Regülasyon

Postbiyotiklerin gıda endüstrisinde kullanımı, güvenlik değerlendirmesi, üretim standardizasyonu ve düzenleyici gereklilikleri ön plana çıkarmaktadır. Preparatların bileşim ve biyolojik aktivitelerindeki farklılıklar, kalite standardizasyonunu ve doz–yanıt ilişkilerinin belirlenmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle suş düzeyinde tanımlama, etkinliğin bilimsel olarak doğrulanması ve doğru etiketleme önem taşımaktadır (Salminen ve ark., 2021; Mafe ve ark., 2026).

Postbiyotiklerin canlı mikroorganizma içermemesi bazı enfeksiyon risklerini azaltabilmekle birlikte endotoksin aktivitesi, aşırı immün yanıt, alerjenite ve üretim kaynaklı kalıntılar gibi potansiyel riskleri ortadan kaldırmamaktadır. Güvenlik değerlendirmelerinde inaktivasyonun doğrulanması, bileşim ve safsızlık analizleri, depolama stabilitesi ve kullanım amacına uygun toksikolojik değerlendirmeler gereklidir. Güvenlik, preparatın özellikleri, uygulama dozu ve hedef tüketici grubu temelinde değerlendirilmelidir (Sánchez ve ark., 2023; Berni Canani ve ark., 2024).

Gıda güvenliği kapsamında mikrobiyal kaynaklı antimikrobiyal preparatların biyofilm kontrolündeki potansiyeli de araştırılmaktadır. Mishra ve ark. (2024), laktik asit bakterilerinden elde edilen preparatların *Listeria monocytogenes* biyofilm oluşumunu baskılayabildiğini bildirmiştir. Ancak laboratuvar koşullarında belirlenen etkinliğin gerçek üretim ortamlarında doğrulanması ve preparatların postbiyotik tanımına uygunluğunun değerlendirilmesi gerekmektedir.

7. Avantajlar, Sınırlılıklar ve Gelecek Perspektifleri

Postbiyotik preparatlar, canlı mikroorganizma içermemeleri ve bazı koşullarda daha yüksek depolama stabilitesi gösterebilmeleri nedeniyle gıda uygulamalarında teknolojik avantajlar sunmaktadır. Ayrıca canlı probiyotiklerle ilişkili bazı enfeksiyon risklerini azaltabilmeleri, hassas tüketici grupları açısından potansiyel bir üstünlüktür. Bununla birlikte, güvenlik ve biyolojik etkinlik preparatın bileşimine ve kullanım koşullarına bağlıdır (Nataraj ve ark., 2020; Żółkiewicz ve ark., 2020).

Başlıca sınırlılıklar, mevcut kanıtların önemli ölçüde *in vitro* ve hayvan çalışmalarına dayanması, insan çalışmalarının sınırlılığı ve preparatların suş, üretim yöntemi ve doz bakımından farklılık göstermesidir. Bu değişkenlik, sağlık etkilerinin genellenmesini ve laboratuvar bulgularının endüstriyel uygulamalara aktarılmasını güçleştirmektedir (Kumar ve ark., 2024; Damián ve ark., 2022).

Gelecekte üretim süreçlerinin standardizasyonu, kontrollü klinik çalışmaların artırılması ve farklı gıda matrislerinde etkinlik ile stabilitenin doğrulanması öncelikli olmalıdır. Proteomik ve metabolomik gibi omik yaklaşımlar, postbiyotik bileşenlerin etki mekanizmalarının açıklanmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca uzun dönem güvenlik verilerinin geliştirilmesi ve düzenleyici çerçevelerin netleştirilmesi, endüstriyel uygulamaların yaygınlaşması açısından önem taşımaktadır (Amobonye ve ark., 2025).

8. Sonuç

Postbiyotikler, sağlık yararı bilimsel olarak ortaya konulmuş canlı olmayan mikroorganizmaları ve/veya bunların bileşenlerini içeren preparatlar olarak gıda biyoteknolojisinde önem kazanmaktadır. Canlı probiyotiklerden farklı olarak etkinliklerinin mikroorganizma canlılığının korunmasına bağlı olmaması, üretim ve depolama süreçlerinde teknolojik avantajlar sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, postbiyotiklerin biyolojik ve teknolojik özellikleri kullanılan mikroorganizma suşuna, fermentasyon koşullarına, inaktivasyon yöntemine ve preparatın bileşimine bağlı olarak değişmektedir.

Postbiyotiklerin antimikrobiyal, antioksidan, antiinflamatuvar ve immünomodülatör aktiviteleri ile bağırsak sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri, fonksiyonel gıda uygulamaları açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Süt ve süt ürünleri, et ve su ürünleri, bitkisel bazlı gıdalar, fonksiyonel içecekler ve aktif ambalajlama sistemlerinde gerçekleştirilen çalışmalar, bu preparatların ürün kalitesinin korunması, mikrobiyolojik güvenliğin desteklenmesi ve raf ömrünün uzatılması açısından değerlendirilebileceğini göstermektedir. Ancak deneysel koşullarda belirlenen biyolojik aktivitelerin gerçek gıda sistemlerinde ve insanlarda aynı düzeyde etki göstereceği varsayılmamalıdır.

Postbiyotiklerin endüstriyel uygulamalarının yaygınlaştırılması için üretim süreçlerinin standardizasyonu, inaktivasyon etkinliğinin doğrulanması, güvenlik değerlendirmelerinin geliştirilmesi ve farklı gıda matrislerindeki stabilitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca kontrollü klinik çalışmaların artırılması ve düzenleyici çerçevelerin netleştirilmesi, güvenilir ve tekrarlanabilir uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak postbiyotikler, geleneksel fermentasyon teknolojilerini modern biyoteknolojik yaklaşımlarla birleştiren ve fonksiyonel gıda endüstrisinde yenilikçi uygulamalara katkı sağlayabilecek önemli bir araştırma alanıdır.

9. Referanslar

- 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 Food Sci Technol*, 75: 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.009>
- Amiri, S., Rezazadeh-Bari, M., Alizadeh-Khaledabad, M., Rezaei-Mokarram, R., & Sowti-Khiabani, M. (2021). Fermentation optimization for co-production of postbiotics by *Bifidobacterium lactis* BB12 in cheese whey. *Waste and biomass valorization*, 12(11), 5869-5884.
- Amobonye, A., Pillay, B., Hlope, F., Asong, S. T., & Pillai, S. (2025). Postbiotics: an insightful review of the latest category in functional biotics. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 41(8), 293.
- Collado, M.C., Vinderola, G., Salminen, S. (2019). Postbiotics: facts and open questions. A position paper on the need for a consensus definition. *Benef Microbes*, 10(7): 711-719. <https://doi.org/10.3920/BM2019.0015>
- Dunand, E., Burns, P., Binetti, A., Bergamini, C., Peralta, G.H., Forzani L., Reinheimer J., Vinderola G. (2019). Postbiotics produced at laboratory and industrial level as potential functional food ingredients with the capacity to protect mice against *Salmonella* infection. *J Appl Microbiol*, 127(1): 219–29. <https://doi.org/10.1111/jam.14276>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2002). Guidelines for the Evaluation of Probiotics in Food; Report of a Joint FAO/WHO Working Group on Drafting Guidelines for the Evaluation of Probiotics in Food; FAO: London, ON, Canada, 30 April–1 May.
- Garrote Achou, C., Cantalejo Díez, M. J., Diaz Cano, J., & Molinos Equiza, X. (2025). Evaluation of Different Nutritional Sources in Lactic Acid Bacteria Fermentation for Sustainable Postbiotic Production. *Foods*. 14(4):649. <https://doi.org/10.3390/foods14040649> PMID: 40002092; PMCID: PMC11854014.
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 14(8):491-502. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75> Epub 2017 Jun 14. PMID: 28611480.

- Gökırmaklı, Ç., Üçgül, B., & Seydim, Z. (2021). FONKSİYONEL GIDA KAVRAMINA YENİ BİR BAKIŞ: POSTBİYOTİKLER. *Gıda*, 46(4), 872-882. <https://doi.org/10.15237/gida.GD21035>
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R. B., Flint, H. J., Salminen, S., Calder, P. C., & Sanders, M. E. (2014). Expert consensus document. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 11(8):506-14. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66> Epub 2014 Jun 10. PMID: 24912386.
- Izuddin, W. I., Loh, T. C., Samsudin, A. A., Foo, H. L. (2018). In vitro study of postbiotics from *Lactobacillus plantarum* RG14 on rumen fermentation and microbial population. *Rev Bras Zootec*, 47: e20170255. <https://doi.org/10.1590/rbz4720170255>
- Kara, O. O. (2024). Fonksiyonel Gıda Üretiminde Yeni Yaklaşımlar. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29(3), 1064-1081. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1528392>
- Liang, D., Wu, F., Zhou, D., Tan, B., & Chen, T. (2024). Commercial probiotic products in public health: current status and potential limitations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(19), 6455–6476. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2169858>
- Mafe, A. N., Sharifi-Rad, J., Calina, D., Ogunyemi, A. J., & Tubi, A. O. (2026). Postbiotics in functional foods: Microbial derivatives shaping health, immunity and next-generation nutrition. *Food Frontiers*, 7(1), Article e70205. <https://doi.org/10.1002/fft2.70205>
- Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E., & Rotondo, J. C. (2023). Probiotics Mechanism of Action on Immune Cells and Beneficial Effects on Human Health. *Cells*. 2;12(1):184. <https://doi.org/10.3390/cells12010184> PMID: 36611977; PMCID: PMC9818925.
- Mishra, B., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Yadavalli, R., Agrawal, D. C., Reddy, H. P., Gorrepati, R., Reddy, C. N., Mandal, S. K., Shamim, M. Z., & Panda, J. (2024). Postbiotics: The new horizons of microbial functional bioactive compounds in food preservation and security. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6, Article 28. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00200-w>
- Moradi, M., Mardani, K., Tajik, H. (2019). Characterization and application of postbiotics of *Lactobacillus* spp. on *Listeria monocytogenes* in vitro and in food models. *LWT-Food Sci Technol*, 111: 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.072>

- Naderi, F., Salami, M., Razavi, S. H., Miran, M., Serpe, M. J., Saldaña, M. D. A., Loebenberg, R., Mallillin, M. C., III, Zhao, S., & Davies, N. M. (2026). Microbially Matured Phytomedicines from Sesame Hull (*Sesamum indicum* L.) Cell-Wall Oligosaccharides: Lactobacillus-Generated Pre-Postbiotics with Antioxidant, Enzyme-Inhibitory and Anti-Helicobacter pylori Activity in a Functional Beverage. *Journal of Phytomedicine*, 1(2), 7. <https://doi.org/10.3390/jphytomed1020007>
- Ramazanidoroh, F., Hosseininezhad, M., Shahrampour, D., Razavi, S. Z., & Wu, X. (2025). Development of a novel active bilayer film incorporated postbiotics: investigation of its characteristics and effects on shelf-life extension of chicken breast fillet. *LWT*, 227, 117972.
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska, H., & Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18, 649–667. <https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6>
- Sezen, A. (2013). Prebiyotik, probiyotik ve sinbiyotiklerin insan ve hayvan sağlığı üzerine etkileri. *Atatürk Üniv. Vet. Bil. Derg.* 8(3): 248-258
- Sharafi, H., Razavi, R., Alipashaeihalabi, A., Hassani, D., Hosseini, S. H., Marhamati, H., ... & Moradi, M. (2025). Lactiplantibacillus plantarum postbiotics and thyme essential oil nanoemulsion-based edible spray: An innovative approach to extending shelf life of rainbow trout fillets. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(2), 876-885.
- Sharma, M., Chandel, D., & Shukla, G. (2020). Antigenotoxicity and cytotoxic potentials of metabiotics extracted from isolated probiotic, *Lactobacillus rhamnosus* MD 14 on Caco-2 and HT-29 human colon cancer cells. *Nutrition and cancer*, 72(1), 110-119.
- Swanson, K. S., Gibson, G. R., Hutkins, R., Reimer, R. A., Reid, G., Verbeke, K., Scott, K. P., Holscher, H. D., Azad, M. B., Delzenne, N. M., & Sanders, M. E. (2020). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of synbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 17(11), 687–701.
- Şengün, İ., Y. (2011). Fermente Gıdaların Üretiminde Kullanılan Laktik Asit Bakterileri, *Biological Diversity and Conservation*, 4 (1), 42-53.
- Tomasik, P., Tomasik, P. (2020). Probiotics, non-dairy prebiotics and postbiotics in nutrition. *Appl Sci*, 10: 1470. <https://doi.org/10.3390/app10041470>

- Tong, Y., Guo, H., Abbas, Z., Zhang, J., Wang, J., Cheng, Q., Peng, S., Yang, T., Bai, T., Zhou, Y., Li, J., Wei, X., Si, D., & Zhang, R. (2023). Optimizing postbiotic production through solid-state fermentation with *Bacillus amyloliquefaciens* J and *Lactiplantibacillus plantarum* SN4 enhances antibacterial, antioxidant, and anti-inflammatory activities. *Front. Microbiol.* 14:1229952. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229952>
- Trymers, M., Wiśniewski, P., Tkacz, K., & Zakrzewski, A. (2026). From Production to Application: Postbiotics in Meat, Meat Products, Other Food Matrices, and Bioactive Packaging. *Foods*, 15(3), 501. <https://doi.org/10.3390/foods15030501>
- Vignesh, A., Amal, T. C., Sarvalingam, A., & Vasanth, K. (2024). A review on the influence of nutraceuticals and functional foods on health. *Food Chemistry Advances*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100749>
- Vinderola, G., Sanders, M. E., Cunningham, M., & Hill, C. (2024). Frequently asked questions about the ISAPP postbiotic definition. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1324565.
- Zhu, Y., Xiao, M., Kang, T., He, Y., Zhang, J., Zhao, Y., & Xiao, X. (2025). The Role of Inactivation Methods in Shaping Postbiotic Composition and Modulating Bioactivity: A Review. *Foods*, 14(13), 2358. <https://doi.org/10.3390/foods14132358>

BÖLÜM 4

DOĞAL GIDA PİGMENTLERİ: RENK, STABİLİTE VE UYGULAMA

Zeynep Görkem DURANTAŞ¹

¹ Lecturer, Ankara University, zgcerit@ankara.edu.tr, 0000-0003-3955-9584

1. Giriş

Renk, tüketicilerin bir gıdayı değerlendirmesinde önemli rol oynayan temel duyuşal özelliklerden biridir. Gıdanın rengi; ürünün tazeliği, olgunluğu, lezzeti ve genel kalitesi hakkında tüketicide beklenti oluşturabilmekte ve ürünün kabul edilebilirliğini etkileyebilmektedir. Bu nedenle gıda endüstrisinde renklendiriciler, yalnızca görsel çekiciliği artırmak için değil, işleme ve depolama sırasında meydana gelen renk kayıplarını telafi etmek ve ürünlerde istenen renk özelliklerini sağlamak amacıyla da kullanılmaktadır (Sigurdson ve ark., 2017).

Sentetik renklendiriciler, yüksek renk verme gücü, geniş renk çeşitliliği, teknolojik işlemlere karşı görece yüksek stabiliteleri ve düşük maliyetleri nedeniyle uzun yıllardır gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, tüketicilerin doğal kaynaklı ve daha az işlenmiş gıda bileşenlerine yönelik ilgisinin artması, doğal pigmentlere olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Güncel çalışmalar, doğal pigmentlerin sentetik renklendiricilere alternatif olmasının yanı sıra sürdürülebilir ve fonksiyonel gıda ürünlerinin geliştirilmesinde de önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Neal ve ark., 2026; Arroyo-Esquivel & Esquivel, 2026).

Doğal gıda pigmentleri; bitkiler, algler, siyanobakteriler, mikroorganizmalar ve hayvansal kaynaklar gibi çeşitli biyolojik kaynaklardan elde edilebilmektedir. Antosiyaninler, karotenoidler, betalainler, klorofiller ve fikobiliproteinler başlıca doğal pigment grupları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu bileşiklerin gıda uygulamalarındaki en önemli sınırlamalarından biri çevresel koşullara karşı gösterdikleri duyarlılıktır. pH, sıcaklık, ışık, oksijen, metal iyonları ve gıda matriksi pigmentlerin stabilitesini etkileyebilmektedir (Wijesekara & Xu, 2024).

Bu nedenle güncel araştırmalar, doğal pigmentlerin elde edilmesi, stabilitesinin artırılması ve farklı gıda sistemlerinde etkin biçimde kullanılmasına yönelik yenilikçi yaklaşımlara odaklanmaktadır. Bu bölümde doğal gıda pigmentlerinin kaynakları, temel özellikleri, önemli pigment grupları, elde edilme ve stabilizasyon yöntemleri ile gıda endüstrisindeki uygulamaları güncel literatür doğrultusunda ele alınacaktır.

2. Doğal Gıda Pigmentlerinin Genel Özellikleri

2.1. Doğal Gıda Pigmentlerinin Tanımı ve Önemi

Doğal gıda pigmentleri, canlı organizmalarda doğal olarak sentezlenen ve gıdalara karakteristik renk kazandıran bileşiklerdir. Bitkiler, algler, siyanobakteriler ve mikroorganizmalar başta olmak üzere farklı biyolojik kaynaklardan elde edilebilen bu bileşikler, renk verme özelliklerinin yanı sıra bazı biyolojik aktiviteleri nedeniyle fonksiyonel gıda bileşenleri olarak da değerlendirilmektedir. Güncel araştırmalar, doğal pigmentlerin kullanım potansiyelinin yalnızca başlangıçtaki renk yoğunluğuna değil, pigmentin kimyasal özellikleri ile kullanılacağı gıda matriksi arasındaki uyuma bağlı olduğunu göstermektedir (Abdelmaksoud ve ark., 2026).

2.2. Doğal Gıda Pigmentlerinin Sınıflandırılması

Doğal pigmentler kaynak, kimyasal yapı, çözünürlük ve renk özellikleri gibi farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir. Kimyasal yapılarına göre antosiyaninler flavonoid türevleri, karotenoidler izoprenoid türevleri, klorofiller pirol türevleri ve betalainler ise kendilerine özgü azot içeren pigmentler olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında fikobiliproteinler, kurkuminoidler, annatto pigmentleri ve mikrobiyal kökenli pigmentler de doğal renk kaynakları arasında yer almaktadır (Neal ve ark., 2026). Güncel sınıflandırmalar, doğal pigmentlerin yalnızca kimyasal yapılarına göre değil, kaynakları ve kullanım alanları dikkate alınarak da değerlendirilmesinin pigmentlerin teknolojik potansiyelinin anlaşılması açısından yararlı olduğunu ortaya koymaktadır (Shi ve ark., 2026).

2.3. Doğal Gıda Pigmentlerinin Kimyasal ve Fizikokimyasal Özellikleri

Pigmentlerin kimyasal yapısı; çözünürlük, renk tonu, renk yoğunluğu, ışık absorpsiyonu ve farklı gıda bileşenleriyle etkileşim gibi fizikokimyasal özelliklerini belirlemektedir. Örneğin antosiyaninler ve betalainler çoğunlukla hidrofilik özellik gösterirken, karotenoidler lipofilik karakterleri nedeniyle yağ fazı içeren sistemlerde daha uygun davranış göstermektedir. Klorofillerin ve diğer pigmentlerin de çözünürlük ve moleküler yapılarına bağlı olarak farklı gıda matrikslerinde farklı renk performansları sergilediği bildirilmektedir. Bu nedenle pigment seçiminin yalnızca istenen renk tonuna göre değil, ürünün bileşimi ve üretim koşulları dikkate alınarak yapılması gerekmektedir (Neal ve ark., 2026; Sigurdson ve ark., 2017).

2.4. Doğal ve Sentetik Pigmentlerin Karşılaştırılması

Doğal pigmentler, tüketici beklentileri ve temiz etiket yaklaşımı açısından önemli avantajlar sağlarken; sentetik pigmentler renk yoğunluğu, stabilite, standardizasyon ve maliyet açısından çoğu zaman daha avantajlıdır. Bununla birlikte, doğal pigmentlerin üretim, ekstraksiyon ve stabilizasyon teknolojilerindeki gelişmeler bu dezavantajların azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Güncel çalışmalar, doğal pigmentlerin sentetik renklendiricilerin evrensel ve doğrudan ikameleri olarak değerlendirilmesi yerine, pigment–gıda matriksi–işleme koşulları arasındaki ilişkinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Neal ve ark., 2026; Arroyo-Esquivel & Esquivel, 2026)

3. Doğal gıda pigmentlerinin kaynakları

Doğal gıda pigmentleri çok çeşitli biyolojik kaynaklardan elde edilebilmekte ve kaynaklarına göre farklı kimyasal ve teknolojik özellikler gösterebilmektedir. Bitkiler, algler, siyanobakteriler, bakteriler, mayalar, filamentöz mantarlar ve hayvansal kaynaklar doğal pigmentlerin başlıca kaynaklarını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda sürdürülebilir üretim yaklaşımlarının gelişmesiyle birlikte tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünleri de değerli pigment kaynakları olarak önem kazanmıştır (Abedelmaksoud ve ark., 2026; Shi ve ark., 2026).

3.1. Bitkisel Kaynaklar

Meyve, sebze, tahıl, baklagil ve baharatlar doğal pigmentlerin en yaygın bitkisel kaynakları arasında yer almaktadır. Üzüm, yaban mersini, nar, mor lahana ve kırmızı soğan gibi bitkisel kaynaklar antosiyaninler açısından; domates, havuç, biber ve mısır ise karotenoidler açısından zengin kaynaklardır. Pancar, betalainlerin; zerdeçal ise kurkuminoidlerin önemli kaynakları arasında bulunmaktadır. Bitkisel pigmentlerin çeşitliliği, farklı gıda sistemlerinde geniş bir renk yelpazesinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Shi ve ark., 2026; Tang ve ark., 2025).

3.2. Mikrobiyal Kaynaklar

Mikroorganizmalar, kontrollü üretim koşulları ve biyoteknolojik yöntemlerle pigment üretilmesi nedeniyle alternatif doğal pigment kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Bakteriler, mayalar ve filamentöz mantarlar; karotenoidler, riboflavinler ve çeşitli diğer pigmentlerin üretiminde kullanılabilmektedir. Mikrobiyal üretim, mevsimsel ve coğrafi

değişkenliklerden bağımsız üretim olanağı sağlaması nedeniyle özellikle sürdürülebilir pigment üretimi açısından önem taşımaktadır (Tang ve ark., 2025).

3.3. Algler ve Siyanobakteriler

Algler ve siyanobakteriler özellikle fikobiliproteinler ve karotenoidler bakımından önemli kaynaklardır. *Arthrospira platensis* (Spirulina) kaynaklı fikosiyanin, yoğun mavi rengi ve biyolojik özellikleri nedeniyle doğal mavi renklendirici olarak dikkat çekmektedir. Mikroalglerin kontrollü koşullarda yetiştirilebilmesi, bu kaynakların gelecekteki doğal pigment üretim sistemleri açısından potansiyelini artırmaktadır (Chettri ve ark., 2026).

3.4. Hayvansal Kaynaklar

Hayvansal kaynaklı doğal pigmentler bitkisel ve mikrobiyal pigmentlere kıyasla daha sınırlı olmakla birlikte gıda endüstrisinde kullanılmaktadır. Karminik asit, *Dactylopius coccus* türünden elde edilen ve kırmızı renk vermek amacıyla kullanılan önemli bir doğal pigment örneğidir. Bununla birlikte hayvansal kaynaklı pigmentlerin kullanımında tüketici tercihleri, alerjenite, etik değerlendirmeler ve mevzuat gibi faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir (Abedelmaksoud ve ark., 2026).

3.5. Tarımsal ve Gıda Endüstrisi Yan Ürünleri

Meyve kabukları, çekirdekleri, posalar ve sebze işleme atıkları önemli miktarlarda doğal pigment içerebilmektedir. Bu yan ürünlerin pigment kaynağı olarak değerlendirilmesi hem atık oluşumunun azaltılması hem de yüksek katma değerli bileşenlerin elde edilmesi açısından sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Güncel çalışmalar, özellikle meyve ve sebze işleme yan ürünlerinin antosiyanin, karotenoid ve diğer doğal pigmentlerin üretiminde değerlendirilmesine yönelik yeşil ekstraksiyon yaklaşımlarının önem kazandığını göstermektedir (Cazón & Sanches Silva, 2024; Futigami ve ark., 2025; Joseph ve ark., 2026; Tomas ve ark., 2025).

4. Başlıca Doğal Gıda Pigmentleri

Doğal gıda pigmentleri kimyasal yapı, çözünürlük, renk özellikleri ve stabilite bakımından önemli farklılıklar göstermektedir. Gıda endüstrisinde en yaygın kullanılan pigment grupları antosiyaninler, karotenoidler, betalainler, klorofiller ve fikobiliproteinlerdir. Bunun yanında

kurkuminoidler, annatto pigmentleri ve mikrobiyal kökenli pigmentler de doğal renklendirici olarak dikkat çekmektedir. Güncel çalışmalar, pigmentlerin yalnızca renk verme özelliklerinin değil, aynı zamanda kaynak sürdürülebilirliği, biyolojik aktiviteleri, gıda matrisiyle uyumluluğu ve stabilizasyon gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Abdelmaksoud ve ark., 2026; Neal ve ark., 2026; Shi ve ark., 2026).

4.1. Antosiyaninler

Antosiyaninler, flavonoid yapıda, suda çözünür pigmentler olup özellikle kırmızı, mor ve mavi tonların oluşumundan sorumludur. Mor üzüm, siyah havuç, kırmızı lahana, yaban mersini, böğürtlen ve çeşitli meyveler önemli antosiyanin kaynaklarıdır (Futigami ve ark., 2025; Neal ve ark., 2026). Renk özellikleri büyük ölçüde ortam pH'sına bağlı olarak değişmekte; asidik koşullarda kırmızı tonlar, daha yüksek pH değerlerinde ise mor ve mavimsi tonlar ortaya çıkmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle antosiyaninler özellikle asidik içecekler, süt ürünleri, şekerleme ve meyve bazlı ürünlerde doğal renklendirici olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte pH, sıcaklık, ışık, oksijen ve metal iyonlarına duyarlılıkları uygulamalarını sınırlandırmaktadır (Dangles, 2024). Son yıllarda şarap üretim yan ürünleri gibi kaynaklardan antosiyaninlerin geri kazanılması, hem pigment üretimi hem de gıda endüstrisi atıklarının değerlendirilmesi açısından önem kazanmıştır

4.2. Karotenoidler

Karotenoidler, sarı, turuncu ve kırmızı renklerden sorumlu, çoğunlukla yağda çözünen izoprenoid pigmentlerdir. β -karoten, likopen, lutein, zeaksantin ve astaksantin en iyi bilinen üyeleri arasında yer almaktadır. Havuç, domates, biber, mısır ve turuncu ürünleri bitkisel karotenoid kaynakları arasında bulunurken, bazı mikroalgler ve mikroorganizmalar da yüksek miktarlarda karotenoid üretebilmektedir (Tomas ve ark., 2025). Karotenoidler yalnızca renk verme amacıyla değil, provitamin A aktivitesi ve antioksidan özellikleri nedeniyle de önem taşımaktadır (Rodríguez-Mena ve ark., 2023). Bununla birlikte oksidasyon, ışık ve yüksek sıcaklık karotenoidlerin yapısal bütünlüğünü ve renk yoğunluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Güncel çalışmalar özellikle karotenoid açısından zengin tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünlerinin sürdürülebilir pigment kaynakları olarak değerlendirilmesine odaklanmaktadır (Neal ve ark., 2026).

4.3. Betalainler

Betalainler, azot içeren ve suda çözünebilen pigmentlerdir. Temel olarak kırmızı-mor renkli betasiyaninler ve sarı-turuncu renkli betaksantinler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Kırmızı pancar, betalainlerin gıda endüstrisindeki en önemli kaynaklarından biridir. Ayrıca bazı *Opuntia* türleri ve diğer Caryophyllales üyeleri önemli betalain kaynaklarıdır. Betalainler özellikle içecekler, şekerlemeler, süt ürünleri ve bitkisel bazlı ürünlerde kullanılabilir. Ancak sıcaklık, ışık, oksijen ve pH değişimleri betalainlerin degradasyonuna neden olabilmekte ve bu durum özellikle ısıtılma işlemi uygulanan ürünlerde kullanımını sınırlandırmaktadır (Neal ve ark., 2026; Wijesekara & Xu, 2024).

4.4. Klorofiller

Klorofiller, bitkilerde ve fotosentetik mikroorganizmalarda bulunan, magnezyum içeren tetrapirel yapılı pigmentlerdir. Özellikle klorofil a ve b, bitkisel dokuların karakteristik yeşil renginden sorumludur. Ispanak, maydanoz, brokoli ve çeşitli yeşil yapraklı sebzeler önemli klorofil kaynaklarıdır. Klorofillerin gıda renklendiricisi olarak kullanımı özellikle yeşil renk istenen ürünlerde önem taşımaktadır. Bununla birlikte asidik ortam, yüksek sıcaklık, ışık ve oksijen klorofil molekülünün merkezindeki magnezyumun uzaklaşmasına ve zeytin yeşili-kahverengi tonların oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle klorofil bazlı renklendiricilerin kullanımında gıda matrisi ve proses koşullarının dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Shi ve ark., 2026; Wijesekara & Xu, 2024).

4.5. Fikobiliproteinler

Fikobiliproteinler, özellikle siyanobakteriler ve kırmızı alglerde bulunan, suda çözünebilen protein-pigment kompleksleridir. Fikosiyanin mavi, fikoeritrin ise kırmızı-pembe tonların oluşumunda rol oynar. Özellikle *Arthrospira* (Spirulina) biyokütlesinden elde edilen fikosiyanin, doğal mavi renk kaynağı olması ve protein içeriği nedeniyle fonksiyonel gıda uygulamalarında önemli bir potansiyele sahiptir. İçecekler, süt alternatifleri, dondurma, şekerleme ve protein bazlı ürünler potansiyel uygulama alanları arasındadır. Mikroalg kökenli pigmentler aynı zamanda sürdürülebilir üretim ve çok işlevli gıda bileşenleri açısından dikkat çekmektedir (Chettri ve ark., 2026; Ma ve ark., 2024; Minić ve ark., 2024).

4.6. Diğer Doğal Pigmentler

Ana pigment gruplarının yanı sıra kurkuminoidler, annatto pigmentleri ve bazı mikrobiyal pigmentler de doğal gıda renklendiricileri arasında değerlendirilmektedir. Zerdeçaldan elde edilen kurkumin karakteristik sarı renk sağlarken, annatto tohumlarından elde edilen biksin ve norbiksin sarı-turuncu tonlar oluşturur. Bunun yanında mikrobiyal biyoteknolojide pigment üretiminin kontrollü üretim, kaynak sürekliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli fırsatlar sunduğu bildirilmektedir. Özellikle metabolik mühendislik ve biyoproses teknolojilerindeki gelişmeler, gelecekte doğal pigmentlerin daha kontrollü ve ölçeklenebilir biçimde üretilmesine olanak sağlayabilir (Shi ve ark., 2026; Tang ve ark., 2025).

5. Doğal Gıda Pigmentlerinin Elde Edilmesi

Doğal gıda pigmentlerinin elde edilmesinde ekstraksiyon yönteminin seçimi, pigmentin kimyasal yapısı, çözünürlüğü, hedeflenen verim ve son ürünün kullanım alanına bağlıdır. Geleneksel yöntemler arasında maserasyon, çözücü ekstraksiyonu ve katı-sıvı ekstraksiyon yaygın olarak kullanılmakla birlikte, uzun işlem süresi, yüksek çözücü tüketimi ve pigmentlerin oksidatif veya termal bozunmaya uğraması gibi sınırlılıklara sahiptir (Rodríguez-Mena ve ark., 2023; Wijesekara & Xu, 2024).

5.1. Geleneksel Ekstraksiyon Yöntemleri

Geleneksel ekstraksiyon yöntemlerinde su, etanol, metanol, aseton ve bunların farklı oranlardaki karışımları kullanılabilir. Suda çözünen antosiyaninler ve betalainler için su veya hidroalkolik çözücüler tercih edilirken, karotenoidlerin ekstraksiyonunda daha düşük polariteli çözücüler kullanılabilir. Ekstraksiyon verimini; çözücü polaritesi, katı/çözücü oranı, sıcaklık, pH ve işlem süresi gibi parametreler belirlemektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık ve uzun işlem süreleri özellikle antosiyaninler, betalainler ve klorofiller gibi hassas pigmentlerde degradasyona yol açabilmektedir (Wijesekara & Xu, 2024).

5.2. Yenilikçi Ekstraksiyon Yöntemleri

Son yıllarda ultrason destekli ekstraksiyon (UAE), mikrodalga destekli ekstraksiyon (MAE), darbeli elektrik alan (PEF), yüksek basınç destekli ekstraksiyon ve süperkritik akışkan ekstraksiyonu gibi yenilikçi teknolojiler doğal pigmentlerin geri kazanımında öne çıkmıştır. Bu yöntemler hücre yapısının parçalanmasını veya kütle transferinin hızlandırılmasını sağlayarak

daha kısa işlem süresi ve daha yüksek ekstraksiyon verimi sunabilmektedir (Cazón & Sanches Silva, 2024). Özellikle PEF, termal olmayan bir yöntem olması nedeniyle pigmentlerin yapısal özelliklerinin korunması açısından dikkat çekmektedir (Sani ve ark., 2024).

5.3. Yeşil Ekstraksiyon Yaklaşımları

Sürdürülebilir üretim yaklaşımının önem kazanmasıyla birlikte doğal pigmentlerin elde edilmesinde düşük toksisiteli çözücüler, su, etanol, doğal derin ötektik çözücüler ve diğer çevre dostu sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Özellikle meyve-sebze kabukları, posa ve şarap üretim yan ürünleri gibi agro-endüstriyel atıklardan pigmentlerin geri kazanılması, hem atıkların değerlendirilmesini hem de yeni pigment kaynaklarının oluşturulmasını sağlamaktadır. Güncel çalışmalar, yeşil ekstraksiyon tekniklerinin yüksek verim ve düşük çevresel etki bakımından geleneksel yöntemlere önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir (Cazón & Sanches Silva, 2024; Joseph ve ark., 2026; Kamalesh ve ark., 2025).

6. Doğal Gıda Pigmentlerinin Stabilitesi ve Stabilizasyonu

Doğal gıda pigmentlerinin sentetik renklendiricilere kıyasla en önemli dezavantajlarından biri, işleme ve depolama koşullarına karşı daha düşük stabilite göstermeleridir. Pigmentlerin kararlılığı; kimyasal yapı, pH, sıcaklık, ışık, oksijen, metal iyonları, enzimler, su aktivitesi ve gıda matrisi gibi çok sayıda faktörün etkileşimi sonucunda belirlenmektedir. Bu nedenle doğal pigmentlerin gıdalarda başarılı biçimde kullanılabilmesi yalnızca uygun pigment kaynağının seçilmesine değil, aynı zamanda pigmentin korunmasına yönelik uygun stabilizasyon stratejisinin belirlenmesine bağlıdır (Wijesekara & Xu, 2024).

6.1. Stabilitayı Etkileyen Faktörler

pH, özellikle antosiyaninlerin renk davranışında belirleyici bir faktördür. Sıcaklık ve ışık ise antosiyanin, betalain ve klorofillerde degradasyonu hızlandırırken, oksijen ve yüksek sıcaklık karotenoidlerin oksidasyonuna neden olabilmektedir. Metal iyonları da bazı pigmentlerle kompleks oluşturarak renk değişimine veya oksidatif bozunmaya yol açabilmektedir. Ayrıca proteinler, lipitler ve polisakkaritler gibi gıda matrisi bileşenleri pigmentlerle etkileşerek hem stabiliteyi artırabilmekte hem de azaltabilmektedir (Wijesekara & Xu, 2024). Özellikle betalainlerin sıcaklık, ışık, oksijen ve metal iyonlarına duyarlılığı, bu pigmentlerin gıda uygulamalarında stabilizasyon gereksinimini artırmaktadır (Leal-Alcazar ve ark., 2025).

6.2. Kopigmentasyon

Kopigmentasyon, özellikle antosiyaninlerin renk yoğunluğunu ve stabilitesini artırmak amacıyla kullanılan önemli bir yaklaşımdır. Antosiyaninler ile fenolik bileşikler, proteinler veya polisakkaritler arasında oluşan hidrofobik etkileşimler, hidrojen bağları ve $\pi-\pi$ etkileşimleri pigment molekülünü stabilize edebilmektedir. Böylece renk yoğunluğunun korunması ve degradasyonun yavaşlatılması mümkün olmaktadır. Güncel çalışmalar, kopigmentasyonun enkapsülasyon teknolojileriyle birlikte kullanılmasının antosiyanin stabilizasyonunda daha etkili sonuçlar sağlayabileceğini göstermektedir (Yang ve ark., 2025).

6.3. Mikroenkapsülasyon ve Nanoenkapsülasyon

Mikroenkapsülasyon ve nanoenkapsülasyon, pigment moleküllerinin çevresel koşullardan korunmasında en fazla araştırılan teknolojiler arasındadır. Bu sistemlerde maltodekstrin, gam arabik, proteinler, polisakkaritler veya farklı biyopolimerler taşıyıcı materyal olarak kullanılabilir. Enkapsülasyon; oksijen, ışık ve nem ile pigment arasındaki teması azaltarak renk stabilitesini artırırken, bazı sistemlerde pigmentin çözünürlüğünü ve biyoyararlanımını da geliştirebilmektedir (Cazón & Sanches Silva, 2024).

6.4. Emülsiyon, Liposomal ve Hidrojel Sistemleri

Özellikle yağda çözünen karotenoidlerin sulu gıda sistemlerine aktarılmasında emülsiyon ve nanoemülsiyon sistemleri önemli avantajlar sunmaktadır. Liposomlar, hidrojel sistemleri ve Pickering emülsiyonları ise pigmentleri çevresel streslerden koruyarak dispersibilite ve stabiliteyi geliştirebilmektedir. Karotenoidlerin enkapsülasyonuna yönelik güncel çalışmalar, bu sistemlerin depolama stabilitesi yanında biyoyararlanım üzerinde de olumlu etkiler sağlayabildiğini göstermektedir (Sereti ve ark., 2025).

6.5. Sprey Kurutma ve Diğer Stabilizasyon Yaklaşımları

Sprey kurutma, doğal pigmentlerin kuru ve daha stabil ürünlere dönüştürülmesinde endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği yüksek yöntemlerden biridir. Bunun yanında dondurarak kurutma, kompleks koaservasyon, iyonik jelasyon ve farklı biyopolimer bazlı taşıyıcı sistemler de pigment stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Güncel yaklaşım, tek bir stabilizasyon yöntemine bağlı kalmak yerine pigmentin kimyasal özellikleri, hedef gıda matrisi ve işlem koşullarını

birlikte değerlendirerek uygun taşıyıcı ve proses kombinasyonunun seçilmesi yönündedir (Cazón & Sanches Silva, 2024; Wijesekara & Xu, 2024).

7. Gıda Endüstrisinde Doğal Gıda Pigmentlerinin Uygulamaları

Doğal gıda pigmentlerinin gıda endüstrisindeki kullanımı; pigmentin kimyasal yapısı, çözünürlüğü, renk tonu ve stabilitesinin yanı sıra gıda matrisinin pH'sı, yağ ve protein içeriği, su aktivitesi ve uygulanan işleme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle doğal pigmentlerin bir üründe başarılı şekilde kullanılabilmesi, yalnızca istenen rengin elde edilmesine değil, pigmentin ürün bileşenleri ve proses koşullarıyla uyumlu olmasına da bağlıdır. Günümüzde doğal pigmentler özellikle tüketicilerin temiz etiketli, bitkisel kaynaklı ve fonksiyonel ürünlere yönelik artan ilgisi doğrultusunda farklı gıda sistemlerinde sentetik renklendiricilere alternatif olarak değerlendirilmektedir (Zhang ve ark., 2024).

Süt ve süt ürünleri, doğal pigmentlerin uygulandığı önemli gıda gruplarından biridir. Yoğurt, dondurma, peynir ve aromalı süt gibi ürünlerde antosiyaninler, karotenoidler, betalainler, klorofiller ve fikobiliproteinler farklı renk tonlarının oluşturulmasında kullanılabilir. Özellikle antosiyanin ve betalainler kırmızı-mor tonların, karotenoidler ise sarı-turuncu tonların sağlanmasında öne çıkmaktadır. Bununla birlikte süt proteinleri ile pigmentler arasındaki etkileşimler renk yoğunluğu ve stabilitesini etkileyebilmekte, bu nedenle mikroenkapsülasyon ve nanoemülsiyon gibi teknolojiler önem kazanmaktadır (Chettri ve ark., 2026; Soutelino ve ark., 2024). Soutelino ve ark., (2024), doğal pigment uygulamalarının özellikle yoğurt, dondurma, peynir ve aromalı süt üzerinde yoğunlaştığını ve stabilite sorunlarının gelişmiş taşıyıcı sistemlerle azaltılmaya çalışıldığını bildirmiştir.

İçecekler de doğal pigmentlerin yaygın olarak kullanıldığı ürünler arasındadır. Meyve bazlı içecekler, fonksiyonel içecekler ve bitkisel içeceklerde antosiyaninler, betalainler, karotenoidler ve fikobiliproteinler kullanılabilir. Ancak sıvı sistemlerde pigmentlerin ışık, oksijen ve pH değişimlerine maruz kalması stabilite sorunlarını artırabilmektedir (Bause ve ark., 2024). Bu nedenle enkapsülasyon, emülsifikasyon ve diğer fizikokimyasal stabilizasyon yaklaşımları doğal pigmentlerin içeceklerde kullanımını geliştirmektedir (Zhang ve ark., 2024).

Fırıncılık ürünlerinde doğal pigmentlerin kullanımı, özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalma nedeniyle daha sınırlıdır. Ekmek, kek, bisküvi ve benzeri ürünlerde karotenoidler ile daha kararlı pigment sistemlerinden yararlanılabilirken, antosiyaninler ve betalainler gibi ısıya duyarlı pigmentlerde renk kaybı görülebilmektedir. Şekerleme, jel, reçel ve tatlı ürünlerinde ise

antosiyenin, betalain ve karotenoidler farklı renk tonlarının elde edilmesinde değerlendirilmektedir. Bu ürünlerde pigment seçimi; pH, su aktivitesi, sıcaklık ve depolama koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır (Pereira ve ark., 2024).

Et ve et ürünleri ile bitkisel et analogları da doğal pigmentlerin gelişmekte olan uygulama alanları arasındadır. Bu ürünlerde renk, tüketicinin ürünün tazeliği ve beklenen kalite özellikleri hakkındaki algısını doğrudan etkilediğinden büyük önem taşımaktadır. Annatto, karotenoidler, antosiyeninler ve betalainler farklı renk efektlerinin oluşturulması amacıyla değerlendirilebilmektedir. Ayrıca doğal pigmentler; protein barları, fonksiyonel içecekler, bitkisel süt alternatifleri ve diğer yeni nesil gıdalarda renk ile birlikte biyolojik aktivite sağlayan çok işlevli bileşenler olarak önem kazanmaktadır (Pöhl & Pöhl, 2024).

Sonuç olarak, doğal pigmentlerin gıda endüstrisindeki uygulama potansiyeli oldukça geniş olmakla birlikte, pigmentin kimyasal özellikleri ile hedef gıda matrisinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle stabiliteyi artıran yeni nesil taşıyıcı ve enkapsülasyon sistemlerinin geliştirilmesi, doğal pigmentlerin daha geniş bir ürün grubunda ticari olarak kullanılabilmesinin temel koşullarından biri olarak değerlendirilmektedir.

8. Doğal Gıda Pigmentlerinin Fonksiyonel Özellikleri

Doğal gıda pigmentleri, gıdalara renk kazandırmalarının yanı sıra çeşitli biyolojik aktiviteleri nedeniyle fonksiyonel bileşenler olarak da değerlendirilmektedir. Özellikle antosiyeninler, karotenoidler, betalainler ve bazı mikrobiyal pigmentler antioksidan, antimikrobiyal ve anti-inflamatuvar özellikleri açısından dikkat çekmektedir. Bu nedenle doğal pigmentler, fonksiyonel gıda formülasyonlarında renk ve biyolojik aktivitenin aynı bileşen üzerinden sağlanmasına olanak sunmaktadır (Shi ve ark., 2026; Zhang ve ark., 2024).

8.1. Antioksidan Özellikler

Birçok doğal pigment serbest radikalleri ve reaktif oksijen türlerini etkisizleştirebilme kapasitesine sahiptir. Özellikle antosiyeninler, karotenoidler ve betalainler farklı antioksidan mekanizmalar üzerinden oksidatif stresi azaltma potansiyeli göstermektedir. Bu özellik, pigmentlerin gıdalarda yalnızca renk verici değil, aynı zamanda oksidatif bozulmayı sınırlayabilen bileşenler olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır (Shi ve ark., 2026; Zhang ve ark., 2024).

8.2. Antimikrobiyal Özellikler

Bazı doğal pigmentler bakteriler, mayalar ve diğer mikroorganizmalar üzerinde inhibe edici etki gösterebilmektedir. Antosiyaninler ve çeşitli mikrobiyal pigmentlerin hücre membranı, hücresel metabolizma ve oksidatif süreçler üzerindeki etkileri antimikrobiyal aktivitelerine katkıda bulunabilmektedir. Bu nedenle doğal pigmentler, temiz etiketli renklendirici ve koruyucu sistemlerin geliştirilmesinde birlikte değerlendirilmektedir (Zhao ve ark., 2026).

8.3. Anti-inflamatuvar Özellikler

Özellikle antosiyaninler ve bazı karotenoidlerin inflamasyonla ilişkili biyokimyasal yolları modüle edebildiği bildirilmektedir. Antosiyaninlerle ilgili güncel çalışmalar, bu pigmentlerin proinflamatuvar süreçleri ve bazı sitokin yanıtlarını azaltma potansiyeline dikkat çekmektedir. Bununla birlikte bu etkilerin pigmentin kimyasal yapısına, dozuna, gıda matrisine ve biyoyararlanımına bağlı olarak değişebileceği dikkate alınmalıdır (Futigami ve ark., 2025; Shi ve ark., 2026).

8.4. Diğer Biyolojik Aktiviteler

Doğal pigmentler ayrıca antikanser, nöroprotektif, kardiyoprotektif ve metabolik sağlıkla ilişkili potansiyel biyolojik aktiviteleri açısından araştırılmaktadır. Bununla birlikte bu etkilerin önemli bir bölümü in vitro veya deneysel çalışmalarla ortaya konmuş olup, insanlarda kesin sağlık etkilerinin belirlenmesi için daha kapsamlı klinik çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

9. Güvenlik, Mevzuat, Tüketici Yaklaşımı ve Gelecek Perspektifi

9.1. Güvenlik ve Mevzuat

Doğal kaynaklı pigmentlerin güvenliği; kimyasal bileşimleri, üretim yöntemleri, saflıkları, olası kontaminantları ve tüketim miktarları dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bir pigmentin doğal kökenli olması, tek başına güvenli olduğunu garanti etmemektedir. Gıda endüstrisinde kullanılacak renklendiricilerin hedef pazardaki mevzuata uygunluğu, izin verilen gıda kategorileri ve kullanım düzeyleri doğrulanmalıdır. Avrupa Birliği'nde gıda katkı maddelerinin kullanımı, izinli maddeleri ve kullanım koşullarını düzenleyen (EC) No 1333/2008 sayılı Tüzük kapsamında değerlendirilirken, ABD'de renk katkı maddeleri kullanım amaçlarına uygun U.S. Food and Drug Administration (FDA) onayına tabidir (European Parliament and Council of the European Union, 2008; U.S. Food and Drug Administration, 2026). Bu nedenle bitkisel, mikrobiyal veya alg kökenli yeni pigmentlerin ticari kullanıma sunulmasında güvenlik değerlendirmesi ve mevzuata uygunluk temel gerekliliklerdir.

9.2. Etiketleme, Tüketici Kabulü ve Temiz Etiket Yaklaşımı

Tüketicilerin anlaşılır içerik listelerine ve doğal kaynaklardan elde edilen bileşenlere yönelik ilgisi, temiz etiket (clean label) yaklaşımının gelişmesini desteklemektedir. Doğal pigmentler, sentetik renklendiricilere alternatif sunmaları bakımından avantajlı olmakla birlikte tüketici kabulü yalnızca doğal kökene bağlı değildir. Renk kalıcılığı, ürünün duyuşal özellikleri, fiyat ve etiket bilgilerinin anlaşılabilirliği de satın alma kararını etkileyebilmektedir. Ayrıca “doğal” ifadesinin mevzuattaki karşılığı pazara göre değişebildiğinden, etiketleme ve tanıtım ifadelerinin ilgili düzenlemelere uygun olması gerekmektedir (Abdelmaksoud ve ark., 2026; Neal ve ark., 2026).

9.3. Sürdürülebilir Kaynaklar ve Mikrobiyal Pigment Üretimi

Tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünleri, doğal pigmentlerin sürdürülebilir biçimde elde edilmesi için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Meyve kabukları, posa ve şarap üretimi yan ürünlerinden pigmentlerin geri kazanılması, atık miktarının azaltılmasına ve döngüsel ekonominin desteklenmesine katkı sağlayabilir (Joseph ve ark., 2026; Cazón & Sanches Silva, 2024). Bunun yanında mikroorganizmalar ve mikroalgler, kontrollü üretim koşulları ve kaynak sürekliliği açısından alternatif pigment kaynaklarıdır. Ancak üretim verimi, parti standardizasyonu, saflaştırma maliyetleri ve güvenlik değerlendirmeleri endüstriyel uygulamada çözülmesi gereken konular arasındadır (Chettri ve ark., 2026; Tang ve ark., 2025).

9.4. Yeni Nesil Teknolojiler ve Gelecek Uygulamaları

Yeşil ekstraksiyon, enzim destekli işlemler, ultrason ve darbeli elektrik alan uygulamaları ile mikroenkapsülasyon ve nanoenkapsülasyon sistemleri, doğal pigmentlerin verimini ve stabilitesini geliştirmeye yönelik başlıca teknolojiler arasındadır (Sani ve ark., 2024; Sereti ve ark., 2025). Gelecekte pigment seçiminin gıda matrisinin özelliklerine göre yapılması, pigment kararlılığının tahmin edilmesi ve farklı taşıyıcı sistemlerin birlikte kullanılması daha fazla önem kazanacaktır. Bununla birlikte laboratuvar ölçeğindeki başarıların endüstriyel üretime aktarılabilmesi için maliyet, ölçeklenebilirlik, uzun süreli stabilite ve mevzuata uygunluk birlikte değerlendirilmelidir (Abdelmaksoud ve ark., 2026).

10. Sonuç

Doğal gıda pigmentleri, sentetik renklendiricilere alternatif olmalarının yanı sıra farklı biyolojik aktiviteleri ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilebilme potansiyelleri nedeniyle gıda endüstrisi açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte pH, sıcaklık, ışık ve oksijen gibi faktörlere duyarlılıkları, ürünlerde renk kaybına ve uygulama kısıtlarına neden olabilmektedir. Yenilikçi ekstraksiyon yöntemleri, mikroenkapsülasyon ve biyoteknolojik üretim yaklaşımları bu sorunların azaltılmasına katkı sağlayabilir. Tarımsal yan ürünlerin ve mikrobiyal kaynakların değerlendirilmesi, çevresel etkilerin azaltılması bakımından da fırsatlar sunmaktadır. Ancak pigmentlerin yaygın kullanımında güvenlik, mevzuata uygunluk, maliyet, endüstriyel ölçeklenebilirlik ve tüketici kabulü birlikte ele alınmalıdır. Bu doğrultuda, pigment özellikleri ile ürün ve proses koşullarını birlikte dikkate alan bütüncül yaklaşımlar belirleyici olacaktır. Araştırmaların bu alanlarda ilerlemesi, doğal pigmentlerin farklı gıda matrislerinde daha kararlı ve işlevsel biçimde kullanılmasını destekleyecektir.

Kaynakça

- Abdelmaksoud, T. G., Al-Kharsa, M. M., Younis, M. I., & Tlay, R. H. (2026). Natural pigments in clean-label foods: A matrix-guided critical review of sources, stability, biofunctionality, regulation, and industrial applications. *Food Research International*, 244, 120506. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2026.120506>
- Arroyo-Esquivel, L., & Esquivel, P. (2026). Natural food colorant applications in the food industry: Alternatives for overcoming stability limitations. *Colorants*, 5(3), 27. <https://doi.org/10.3390/colorants5030027>
- Bause, K., Bußler, S., de Munnik, M., Reineke, K., van den Berg-Stolp, F., Zanders, F., & Zillekens, A. (2024). Challenges and opportunities in the use of natural colors in foods and beverages: An industrial perspective. In R. Schweiggert (Ed.), *Handbook on natural pigments in food and beverages* (2nd ed., pp. 577–604). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99608-2.00013-6>
- Cazón, P., & Sanches Silva, A. (2024). Natural pigments from food wastes: New approaches for the extraction and encapsulation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47, 100929. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100929>
- Chettri, S., Altemimi, A. B., Das, P., Singh, R., Said, P. P., Nath, P. C., Pandey, V. K., & Rustagi, S. (2026). Recent advances in microalgal pigments as a source of natural colors and their application in next-generation functional foods. *Sustainable Food Technology*, 4(2), 1350–1371. <https://doi.org/10.1039/d5fb00537j>
- European Parliament and Council of the European Union. (2008). Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives. *Official Journal of the European Union*, L 354, 16–33. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/1333/oj>
- U.S. Food and Drug Administration. (2026). Color additives. <https://www.fda.gov/industry/color-additives>
- Futigami, L. S., Bredun, M. A., Reitenbach, A., & Burin, V. M. (2025). Anthocyanins as natural edible pigments: A review on obtaining from winemaking byproducts. *ACS Food Science & Technology*, 5(11), 4024–4038. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.5c00677>

- Kamalesh, R., Saravanan, A., Yaashikaa, P. R., & Vijayasri, K. (2025). Innovative approaches to harnessing natural pigments from food waste and by-products for eco-friendly food coloring. *Food Chemistry*, 463(Pt 4), 141519. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141519>
- Joseph, L. P., Bhardwaj, N., Dulta, K., Iqbal, H., Singh, A., Aman, J., Yadav, P., Onyeaka, H., & Ghosh, S. (2026). Agro-industrial by-products as sustainable sources of natural food pigments: Extraction, stability, and applications. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2026, 7679052. <https://doi.org/10.1155/jfpp/7679052>
- Leal-Alcazar, M. C., Bautista-Palestina, F., Rocha-Pizaña, M. D. R., Mojica, L., Hernández-Álvarez, A. J., & Luna-Vital, D. A. (2025). Extraction, stabilization, and health application of betalains: An update. *Food Chemistry*, 481, 144011. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144011>
- Ma, J., Hu, J., Sha, X., Meng, D., & Yang, R. (2024). Phycobiliproteins, the pigment-protein complex form of natural food colorants and bioactive ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(10), 2999–3017. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2128714>
- Minić, S., Gligorijević, N., Veličković, L., & Nikolić, M. (2024). Narrative Review of the Current and Future Perspectives of Phycobiliproteins' Applications in the Food Industry: From Natural Colors to Alternative Proteins. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 7187. <https://doi.org/10.3390/ijms25137187>
- Neal, W. M., Osman, A. G., Khan, I. A., & Chittiboyina, A. G. (2026). Natural product-based colorants as substitutes for petroleum-based synthetic food dyes: Sources, chemistry, and characteristics. *Food Chemistry*, 501, 147561. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147561>
- Pereira, T., Barroso, S., Pinto, F. R., Silva, F., Teixeira, P., Mendes, S., & Gil, M. M. (2024). Application of microalgae as natural colorant for pastry and confectionary products. *Food Science & Nutrition*, 12(11), 9479–9492. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4394>
- Pöhl, H., & Pöhl, T. (2024). Applications of different curing approaches and natural colorants in meat products. In R. Schweiggert (Ed.), *Handbook on natural pigments in food and beverages* (2nd ed., pp. 295–315). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99608-2.00016-1>

- Rodríguez-Mena, A., Ochoa-Martínez, L. A., González-Herrera, S. M., Rutiaga-Quiñones, O. M., González-Laredo, R. F., & Olmedilla-Alonso, B. (2023). Natural pigments of plant origin: Classification, extraction and application in foods. *Food Chemistry*, 398, 133908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133908>
- Sani, I. K., Mehrnoosh, F., Rasul, N. H., Hassani, B., Mohammadi, H., Gholizadeh, H., Sattari, N., Kaveh, M., Khodaei, S. M., Alizadeh Sani, M., Eghbaljoo, H., Assadpour, E., Zhang, F., & Jafari, S. M. (2024). Pulsed electric field-assisted extraction of natural colorants: Principles and applications. *Food Bioscience*, 61, 104746. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104746>
- Sereti, F., Alexandri, M., Papapostolou, H., Papadaki, A., & Kopsahelis, N. (2025). Recent progress in carotenoid encapsulation: Effects on storage stability, bioaccessibility and bioavailability for advanced innovative food applications. *Food Research International*, 203, 115861. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115861>
- Shi, Z., Zhao, Y., Meng, J., Bo, Y., Zhao, Q., Zhang, G., Zhang, L., Wang, Y., Yuan, W., Wang, J., Guo, L., & Gao, W. (2026). Natural food pigments: From biosynthesis to application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 74(15), 11885–11916. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c05093>
- Sigurdson, G. T., Tang, P., & Giusti, M. M. (2017). Natural colorants: Food colorants from natural sources. *Annual Review of Food Science and Technology*, 8, 261–280. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923>
- Soutelino, M. E. M., Vieira, G. P., Goulart, M. B., Miranda, K. C., Conceição, R. P., Pimentel, T. C., Cruz, A. G., & Rocha, R. S. (2024). Natural food dyes on dairy products: A critical approach between 2012–2023 literature regarding the technological and functional aspects, health benefits and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 146, 104370. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104370>
- Tang, Q., Li, Z., Chen, N., Luo, X., & Zhao, Q. (2025). Natural pigments derived from plants and microorganisms: Classification, biosynthesis, and applications. *Plant Biotechnology Journal*, 23(2), 592–614. <https://doi.org/10.1111/pbi.14522>
- Tomas, M., Kamiloglu, S., Nemli, E., Ozdal, T., Haque, S., Apak, R., & Capanoglu, E. (2025). From carotene-rich waste-to-food: Extraction, food applications, challenges and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 155, 104756. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104756>

- Wijesekara, T., & Xu, B. (2024). A critical review on the stability of natural food pigments and stabilization techniques. *Food Research International*, 179, 114011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114011>
- Yang, M., Zhang, M., Wang, B., Zhang, Z., Zhuang, Y., Liu, J., Zhang, Q., & Fei, P. (2025). Mechanism-driven stabilization of anthocyanins: Comparative copigmentation and encapsulation for food applications. *Food Chemistry*, 495(Pt 1), 146336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146336>
- Zhang, Z.-H., Chen, J., Huang, X., Aadil, R. M., Li, B., & Gao, X. (2024). Natural pigments in the food industry: Enhancing stability, nutritional benefits, and gut microbiome health. *Food Chemistry*, 460(Pt 1), 140514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140514>
- Zhao, L., Qu, Y., Shang, G., Jiang, W., Shen, Q., Ke, J., Ma, Y., Zhang, L., & Bian, H. (2026). Natural pigments for microbial control in food systems: Mechanisms, preservation applications, and formulation strategies. *Food Control*, 180, 111629. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111629>