




GIDA
THE JOURNAL OF FOOD
E-ISSN 1309-6273, ISSN 1300-3070

Derleme/Review
GIDA (2026) 51 (3) 555-582
doi:10.15237/gida.GD26004

AKTİF AMBALAJLAMA UYGULAMALARI VE AKILLI AMBALAJ TEKNOLOJİLERİ İLE İZLENEBİLİRLİK UYGULAMALARININ GIDA GÜVENLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Tansu YILDIRIM AYAYDIN^{1*}, Tuğba DURSUN ÇAPAR¹ 

¹Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

Received / Geliş: 03.12.2025; Accepted / Kabul: 17.04.2026; Published online / Online baskı: 31.05.2026

ÖZ

Aktif ve akıllı ambalajlama teknolojileri, gıda ürünlerinde raf ömrünün uzatılması, kalite değişimlerinin izlenmesi ve gıda güvenliğinin artırılması amacıyla geliştirilen yenilikçi teknolojiler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu ambalaj sistemlerinin sensörler, RFID tabanlı etiketler ve gerçek zamanlı veri izleme altyapılarıyla bütünleştirilmesi, gıda tedarik zincirinde izlenebilirliğin güçlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, veri paylaşımının standardizasyonu, bilgi güvenliği, maliyet etkinliği ve teknik uyumluluk gibi hususlar, yaygın uygulamanın önünde yer alan temel kısıtlar olarak öne çıkmaktadır. Bu derleme çalışması, aktif ve akıllı ambalajlarda kullanılan antimikrobiyal, antioksidan ve tazelik indikatörü gibi fonksiyonel bileşenler ile dijital izlenebilirlik sistemlerinin gıda güvenliği üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde değerlendirmektedir. Mevcut literatür, bu entegrasyonun yalnızca kontaminasyonun erken tespiti ve geri çağırma süreçlerinin etkinliğini artırmakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda gıda sahteciliğinin önlenmesi, sürdürülebilirliğin desteklenmesi, risk yönetiminin geliştirilmesi ve tüketici güveninin artırılması açısından da kritik bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Gıda izlenebilirliği, aktif ambalajlama, akıllı ambalajlama, gerçek zamanlı izleme, gıda güvenliği

THE EFFECTS OF ACTIVE PACKAGING APPLICATIONS AND INTELLIGENT PACKAGING TECHNOLOGIES WITH TRACEABILITY SYSTEMS ON FOOD SAFETY

ABSTRACT

Active and intelligent packaging technologies constitute a significant class of innovative approaches developed to extend the shelf life of food products, monitor quality changes, and enhance food safety. The integration of these packaging systems with sensors, RFID-based labels, and real-time data monitoring infrastructures contributes substantially to strengthening traceability throughout the food supply chain. Nevertheless, challenges related to data standardization, information security, cost-effectiveness, and technical compatibility remain major constraints limiting widespread implementation. This review comprehensively evaluates the effects of functional components used in active and intelligent packaging-such as antimicrobial and antioxidant agents and freshness indicators-together with digital traceability systems on food safety. The existing literature indicates that such integration not only improves the early detection of contamination and the efficiency of recall processes but also plays a critical role in preventing food fraud, supporting sustainability, enhancing risk management, and increasing consumer confidence.

Key words: Food traceability, active packaging, intelligent packaging, real-time monitoring, food safety

Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author: Tansu YILDIRIM AYAYDIN

ORCID No: 0000-0001-5624-6948 **E-posta:** tansuyildirim01@hotmail.com



Gıda Dergisi Creative Commons Atıf-Gayri Ticari 4.0 (CC BY-NC 4.0) Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.
The Journal of FOOD is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0).

GİRİŞ

Gıda güvenliği, kalite güvencesi ve sürdürülebilir üretim modellerine yönelik artan toplumsal ve endüstriyel beklentiler, aktif ve akıllı ambalaj teknolojilerinin geliştirilmesine olan ihtiyacı artırmış ve bu teknolojilerin hızla gelişmesine katkı sağlamıştır. Geleneksel ambalajlama yaklaşımları büyük ölçüde pasif bariyer fonksiyonları sağlarken, çağdaş teknolojik inovasyonlar gıdanın korunmasını iyileştiren ve kalite kayıplarını en aza indiren, raf ömrünü uzatan, israfı azaltan ve tüketici etkileşimini artıran aktif ve akıllı ambalajların entegrasyonunu mümkün kılmıştır.

Gıda endüstrisinin gelişmesi ve ürünlerin ticarileşmesi açısından doğru şekilde tasarlanmış ambalaj sistemlerinin önemi iyi bilinmektedir; ancak günümüz tüketim alışkanlıkları, çoğu kez uygunsuz depolama, nakliye süreçlerindeki aksaklıklar veya bozulma nedeniyle ortaya çıkan gıda kalite kayıplarının da etkisiyle gıda atıklarında artışa yol açmıştır (Nascimento vd., 2021). Bu sorunlara yanıt olarak ambalaj teknolojileri alanında çeşitli yenilikler geliştirilmiş ve özellikle akıllı ambalaj teknolojileri ön plana çıkmıştır. Küresel gıda üretimindeki hızlı artış ve gıdaya yönelik artan talep, gıda atığı yönetimine ilişkin kaygıları derinleştirmiş olup bu durum önemli ekonomik, çevresel ve etik sorunları beraberinde getirmektedir. Gıda, insan yaşamının sürdürülebilmesi açısından vazgeçilmez olmasına rağmen, üretim, işleme, taşıma ve tüketim sonrası aşamalar da dahil olmak üzere tedarik zinciri boyunca önemli miktarlarda kayıp ve atık oluşmaktadır (Sharma vd., 2024). Avrupa'da yalnızca üretim aşamasında yılda yaklaşık 30 milyon ton yenilebilir olmayan gıda atığı olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca, 2019–2024 yılları arasında %4,3 bileşik yıllık büyüme oranı ile 2024 yılında 4,1 trilyon dolarlık bir hacme ulaşması beklenen gıda işleme sektörünün büyümesine paralel olarak gıda atıklarının da artması beklenmektedir (Caldeira vd., 2020).

Gıda güvenliği, modern toplumlarda halk sağlığının korunması ve gıda zincirinin bütüncül sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Karmaşık ve çok aşamalı küresel tedarik zincirleri, ürünlerin üretim, işleme, depolama ve dağıtım süreçlerinde çoklu risk faktörlerine maruz kalmasına yol açmakta; bu durum, kontaminasyonun tespiti ve gıda kaynaklı hastalıkların önlenmesini önemli ölçüde güçleştirmektedir. Gıda güvenliğinin sağlanmasında, ileri teknolojik çözümler ve sistematik izleme yaklaşımları kritik bir rol oynamaktadır. Son yıllarda geliştirilen aktif ve akıllı ambalaj sistemleri, farklı işlevsel mekanizmalar aracılığıyla gıda güvenliğine katkı sağlamaktadır.

Aktif ambalaj sistemleri, antimikrobiyal ve antioksidan bileşenler içeren yapıları sayesinde ürünlerin raf ömrünü uzatmakta ve kalite kayıplarını en aza indirmektedir. Buna karşılık, akıllı ambalaj teknolojileri, sensörler ve indikatörler aracılığıyla kalite parametrelerinin gerçek zamanlı izlenmesine olanak tanımaktadır.

Geleneksel ambalaj uygulamaları, ürün ile dağıtım kanalları arasında belirli bir bağ oluştursa da, günümüz pazarının dinamik taleplerini karşılamada yetersiz kalmıştır. Bu doğrultuda, gıda güvenliğinin sağlanması, koruyucu kullanılmaması veya minimum düzeyde kullanılması, atık miktarının azaltılması, raf ömrünün uzatılması, gerçek zamanlı durum izlemesi ve ürünlerin küresel ölçekte rekabet edebilirliğinin artırılması gibi çok boyutlu işlevleri yerine getirebilecek ambalaj teknolojilerinin geliştirilmesi zorunlu hâle gelmiştir (Alam vd., 2021; Firouz vd., 2021). Akıllı ambalaj sistemleri, özellikle izlenebilirlik ve ürün izleme süreçlerini destekleyerek ürün takibi, doğrulama mekanizmaları ve tüketici ile ürün arasındaki etkileşimi güçlendiren çeşitli veri taşıyıcı bileşenler içermektedir.

İzlenebilirlik sistemleri, üretimden dağıtımına kadar olan gıda tedarik zincirinde kritik bir kontrol mekanizması olarak işlev görmektedir; akıllı ambalaj teknolojileri ile entegrasyonu sayesinde şeffaflık ve veri doğrulanabilirliği artırılarak kontaminasyon ve kalite risklerinin erken aşamada belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Akıllı ambalaj teknolojileri ile entegre edilen izlenebilirlik sistemleri, gıda güvenliği ve risk yönetimi süreçlerinin güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. RFID tabanlı sistemler, sensör teknolojileri ve IoT tabanlı veri yönetimi sayesinde ürünlerin tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği sağlanmakta ve şeffaflık artırılmaktadır. Bu sayede hem ekonomik hem çevresel boyutlarda sistemik avantajlar elde edilmektedir (Neethirajan vd., 2018).

Akıllı ambalaj teknolojileri ile entegre edilen izlenebilirlik sistemleri, gıda güvenliği yönetimi alanında hem teorik çerçevelerin geliştirilmesine hem de pratik uygulamaların iyileştirilmesine katkıda bulunarak modern tedarik zincirlerinin güvenilirliğini artırmaktadır. Akıllı ambalaj teknolojilerinin geniş ölçekte uygulanabilirliği, yalnızca teknik performansına değil, aynı zamanda tüketicilerin bu sistemlere ilişkin farkındalık ve kabul düzeylerine de bağlıdır (Pirsa ve Alizadeh, 2011). Ayrıca gıda endüstrisi paydaşları, araştırmacılar ve düzenleyici otoriteler arasında kurulacak etkin iş birliği, mevcut mevzuat engellerinin aşılması ve akıllı ambalaj uygulamalarının yaygın kullanıma uygun şekilde geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır (Liu vd., 2022a). Gelecekteki araştırmaların, sensör

doğruluğunun artırılması, ambalaj materyallerinin biyolojik olarak parçalanabilirlik kapasitesinin geliştirilmesi ve küresel gıda endüstrisinin karşılaştığı yapısal zorlukların çözümüne katkı sağlamak amacıyla düşük maliyetli, yüksek performanslı ambalaj çözümlerinin tasarlanmasına odaklanması gerekmektedir (Pirsa vd., 2020). Ayrıca, gıda ambalajlarında kullanılan biyosensör ve nanoteknoloji tabanlı sistemlerin gerçek kullanım koşullarındaki performansına ilişkin çalışmalar, bu teknolojilerin kararlılık, güvenilirlik ve düzenleyici uyum açısından kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamalıdır (Erfani vd., 2023).

Akıllı gıda ve ambalajlama teknolojilerinin, gıda güvenliği, kalite güvencesi ve sürdürülebilirlik alanlarında yenilikçi çözümler sunarak gıda endüstrisinde köklü bir dönüşüm yaratacağı öngörülmektedir (Pirsa vd., 2024). Aktif ambalaj sistemleri, gıdanın raf ömrünü uzatmak amacıyla antimikrobiyal, antioksidan veya gaz düzenleyici bileşenler gibi işlevsel ajanlar içermektedir (Drago vd., 2020). Tüketicilerin taze, güvenilir ve yüksek kaliteli ambalajlı gıdalara yönelik artan eğilimi; satın alma ve tüketim süreçlerinde kolaylık beklentilerinin yükselmesi ve üreticilerin ürün raf ömrünü iyileştirmeye yönelik endüstriyel hedefleri, aktif ve akıllı ambalaj teknolojilerinin küresel ölçekte yaygın kullanımını hızlandıran başlıca itici güçleri oluşturmaktadır (Salgado vd., 2021; Nath vd., 2023). Bu teknolojiler, özellikle süt ürünleri, et ve kümes hayvanları ile çeşitli hazır yemek kategorilerinde mikrobiyal güvenliğin sağlanması, oksidatif bozulmanın kontrol edilmesi ve kalite parametrelerinin korunması açısından önemli bir potansiyel taşımaktadır. Bu çalışma, aktif ambalaj uygulamalarının gıda güvenliği ve kalite üzerindeki etkileri ile akıllı ambalaj teknolojileri ve bu teknolojilerle ilişkili izlenebilirlik sistemlerinin gıda güvenliği üzerindeki rolünü bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca çalışmada, bu teknolojilerde kullanılan yenilikçi yaklaşımlar kapsamlı bir şekilde analiz edilmekte; gıda tedarik zincirinde izleme, doğrulama, risk yönetimi ve kalite güvence süreçlerine sağladıkları katkılar sistematik olarak incelenmektedir.

Son yıllarda aktif ve akıllı ambalaj sistemleri, sensör teknolojileri, biyosensörler ve nanoteknoloji tabanlı algılama sistemleri gıda kalitesinin izlenmesi ve gıda güvenliğinin sağlanmasına yönelik önemli araştırma alanları haline gelmiştir. Literatürde bu teknolojilerin geliştirilmesine ve gıda bozulmasının tespitine yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, söz konusu sistemlerin gıda izlenebilirliği ile olan ilişkisini bütüncül bir bakış açısıyla ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Özellikle sensör tabanlı akıllı ambalaj teknolojilerinin gıda tedarik zinciri boyunca veri üretimi, kalite değişimlerinin izlenmesi ve gıda güvenliği risklerinin erken tespiti açısından nasıl bir rol oynayabileceğine dair kapsamlı değerlendirmelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Aktif Ambalajlama Teknolojisi

Modern aktif ambalajlama sistemleri, geleneksel koruyucu veya katkı maddesi kullanımına alternatif olarak, gıdanın iç ve dış ortam koşullarını dinamik biçimde yöneterek güvenlik ve kalite parametrelerini optimize eden yenilikçi teknolojiler sunmaktadır. Bu sistemler aynı zamanda gıda israfının azaltılması, mikrobiyal ve oksidatif bozulmaların kontrol altına alınması ve alerjen kaynaklı istenmeyen etkilerin en aza indirilmesiyle sürdürülebilir gıda sistemlerinin gelişimine katkıda bulunmaktadır.

Gıda tedarik zinciri boyunca ambalajlama, proses yönetimi, lojistik operasyonlar ve depolama koşullarında ortaya çıkabilecek kalite kayıplarının ve güvenlik risklerinin minimize edilmesinde stratejik bir rol oynamaktadır. Geleneksel ambalaj çözümleri; oksijen ve nem geçişi, mikrobiyal yük artışı, fiziksel darbe, kontaminant girişleri ve çevresel kirleticiler gibi dış faktörlere karşı koruyucu bir bariyer oluşturarak ürünün raf ömrü boyunca güvenliğini ve yapısal bütünlüğünü sağlamaktadır (Ahvenainen, 2003). Aktif ambalajlama; nem, oksijen ve etilen gibi istenmeyen bileşenlerin tutulmasını veya antioksidanlar ile antimikrobiyal ajanlar gibi faydalı bileşiklerin ambalaj atmosferine kontrollü salınımını mümkün kılan bileşenlerin ambalaj yapısına entegre edilmesi esasına dayanır (Firouz vd., 2021). Bu yaklaşımın amacı, ambalaj içerisindeki gıda ile aktif bir etkileşim oluşturarak ürünün raf ömrünün uzatılmasıdır.

Aktif ambalajlama konsepti; gaz kontrolünü sağlayan oksijen, karbondioksit ve etilen tutucu sistemleri, gıda ortamındaki nem dengesini optimize eden nem düzenleyiciler ile mikrobiyal ve oksidatif bozulmayı önlemeye yönelik antimikrobiyal ve antioksidan ajanlardan oluşan gelişmiş fonksiyonel bileşenleri kapsamaktadır (Pereira vd., 2012). Bu unsurlar, gıda kalitesinin korunması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla ambalaj ortamını aktif biçimde modüle etmektedir. Ambalajdaki aktif bileşenler, keseler, etiketler veya film tabakaları biçiminde ambalaj sistemine entegre edilmekte olup, keseler genellikle ambalajın üst boşluğuna, etiketler ise kapak veya yan yüzeylere yerleştirilmektedir. Direkt temas durumunda oluşabilecek migrasyon ve gıda matrisinde istenmeyen kimyasal veya biyokimyasal etkileşimler nedeniyle, bu sistemlerin tasarımında

gıda yüzeyi ile doğrudan temas genellikle sınırlandırılmaktadır. Aktif ambalaj uygulamalarının geniş ölçekte benimsenmesini zorlaştıran başlıca etken, antimikrobiyal ve antioksidan bileşenlerin ürünün raf ömrü boyunca etkili kalacak biçimde ambalaj materyaline ya da polimer yapıya entegre edilmesindeki teknik zorluklardır. Bu sürecin başarısı, gıda güvenliği ve kalite korunumu açısından büyük önem taşır. Ek olarak, daha yüksek biyolojik aktivite ve raf ömrü sağlayabilecek yeni antimikrobiyal ve fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir (Xu vd., 2025). Ticari olarak temin edilebilen aktif ambalajlama sistemlerinin sınıflandırılması Çizelge 1’de verilmiştir.

Nem Düzenleyiciler

Su aktivitesi ve nem, gıdaların mikrobiyal bozulmaya yatkınlığını, kimyasal reaksiyonları ve tüketici tarafından algılanan duyuşal özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdir.

Ambalaj içerisindeki düşük bağıl nem, depolama sırasında nem duyarlılığı yüksek kuru ürünlerde kalite bozulmalarına neden olabilir. Bunun aksine yüksek nem, mikrobiyal aktiviteyi artırarak ürün dokusunda ve görünümünde istenmeyen değişikliklere yol açar ve raf ömrünü kısaltır (Lee ve Robertson, 2021). Buna karşın çiğ balık, et, meyve ve sebze gibi su kaybına duyarlı taze ürünlerde ambalaj içinde daha yüksek bağıl nem (Relative Humidity, RH) seviyelerinin korunması kaliteyi desteklemektedir. Higroskopik bileşenler kullanan nem emiciler ise su aktivitesini azaltarak mikroorganizma gelişimine elverişsiz koşullar yaratılmayı hedeflenmektedir (Coles ve Kirwan, 2011). Bovi ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan çalışmada, paket içi nemin kontrol edilmesi amacıyla çilekler fruktoz içeren filmlerle ambalajlanmıştır. Araştırma sonuçları, ambalaj içerisinde yoğunlaşmanın minimum seviyede gerçekleştiğini ve ağırlık kaybının %1’in altında tutulabildiğini göstermiştir.

Çizelge 1. Ticari olarak temin edilebilen aktif ambalajlama sistemleri

Table 1. Commercially available active packaging systems

Özellik	İşlev	Kullanım Alanı	Materyal
Tenderpac®	Nem düzenleyici	Et ve et ürünleri	Poliolen teraftalat (PET) lepsi içerisinde entegre edilen nem absorban sistemden oluşmaktadır (Ahmed vd., 2017; Drago vd., 2020).
BIOPAC	Etilen tutucu	Taze ürünler (meyve-sebze)	Gözenekli taşıyıcı matrisle potasyum permanganat içeren ambalaj materyalinden oluşmaktadır (Alvarez-Hernández vd., 2019; Drago vd., 2020).
FreshPax®	Karbondioksit yayıcı	İşlenmiş ve önceden pişirilmiş gıdalar	Gıdaya uygun aktif paket ve filmler (Hempel, 2014; Drago vd., 2020).
CeloxTM	Oksijen tutucu	Kutu içecekler	Oksijen tutucu kapak sızdırmazlık malzemeleri ve kaplamalarda kullanılmaktadır (Selvamuthukumar, 2021; Drago vd., 2020).
Biomaster®	Antimikrobiyal ajan	Soğutulmuş ve dondurulmuş ürünler	Gümüş iyonu vb. antimikrobiyal ajan içeren polimerik soğuk çanta ve yüzeylerde kullanım alanı bulunmaktadır (Luzardo vd., 2024; Drago vd., 2020).
Pure Temp	Faz değişim malzemeleri	Dondurulmuş gıdalar, soğuk depolama	Palm yağı, hindistan cevizi yağı ve soya yağı bazı PCM sistemlerinden oluşmaktadır (Dash ve Mahanwar, 2021; Drago vd., 2020).
Fresh Check®	Zaman-sıcaklık etiketi	Soğukta muhafaza edilmesi gereken gıdalar, hazır yemek preparatlarında (örneğin sandviç, hamburger vb.)	Sıcaklıkta aktive edilen bu sistemler, diasetilenik monomerlerin polimerizasyonu sonucu etiketin renginin değişmesiyle ajan oluşturmaktadır. (Han, 2005; Gök, 2007; Smolander, 2003).
Vitsab®/PakSense®	Enzimatik zaman-sıcaklık indikatörü	Sıcaklığa duyarlı gıdalar	Bu etiketler, birinde sıvı fazda süspansiyon edilmiş lipaz substratı ve pH indikatörü, diğerinde ise lipaz enzimi bulunan iki mikro-kesecekten oluşmaktadır (Gök, 2007; Tasuke ve Labzsa, 2003; Robertson, 2006).
OnVu®	Sevkiyat ve dağıtım indikatörü	Et, kırmızı hayvanları, balık, süt ve süt ürünleri, taze sebze-meyve, meyve suyu ve hazır gıda ürünleri	Bu teknolojiye, ürüne zarar vermeyen organik pigmentler kullanılarak sıcaklık dalgalanmalarına duyarlı renk değişimleri üretilmektedir (Anonim, 2010).
Freshtag®/RipeSense®	Tazelik indikatörü	Meyve ve sebzeler	Bu sistem, olgunlaşma sırasında salınan uçucu aroma bileşenlerinin algılanmasına dayanır (Anonim, 2010; Robertson, 2006).
Guard™/Food Sentinel System™	Patogen indikatörü	Gıda ürünleri	Bu sistem, barkod üzerindeki membrana immobilize edilen antikoların kontaminant bakterilerle gerçekleştiği immünokimyasal etkileşime dayanmaktadır (Han vd., 2005; Kerry vd., 2006; Smolander, 2003).
Ageless-Eye®/Vitalon®/Sams-Checker®	Gaz konsantrasyon indikatörü	Modifiye atmosfer ambalaj	Belirli gazların varlığını ya da yokluğunu izlemeyi sağlayan sistemlerdir.

Etilen Tutucular

Meyve ve sebzeler hasat edildikten sonra da metabolik aktivitelerini tamamen sonlandırmayıp solunum yoluyla fizyolojik süreçlerini sürdürürler. Bu süreçte hasat sonrası kalite ve raf ömrünü önemli ölçüde etkileyen etilen (C_2H_4) gazı birçok üründe doğal olarak üretilir. Büyüme ve olgunlaşma süreçlerinde temel bir düzenleyici fitohormon olan etilen, bitki metabolizmasının doğal bir ürünü olup hem endojen hem de eksojen olarak sentezlenebilmektedir. Meyveler olgunlaştıkça ürettikleri etilen miktarı artar ve hasat sonrası dönemde de birçok üründe etilen oluşumu sürer. Etilen, olgunlaşmayı desteklemekle birlikte, solunumu hızlandırarak raf ömrünü kısaltır ve klorofil yıkımını artırarak ürün kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturur. Ayrıca etilen, meyvelerde hücresel yapı zayıflamasına bağlı aşırı yumuşamayı teşvik etmektedir. Etilen adsorpsiyonuna yönelik sistemler, etilenin hızlandırdığı olgunlaşma süreçlerini baskılayarak raf ömrünü iyileştirmede ve ürün kalitesini sürdürmede önemli rol oynamaktadır (Kumar vd., 2024). Bu kapsamda kullanılan etilen adsorbanları arasında silika bazlı materyaller, zeolitler, montmorillonit ve kloisit gibi kil mineralleri ile aktif karbon yer almaktadır. Bu materyaller, genellikle ambalaj içine yerleştirilen poşetler şeklinde kullanıldığı gibi polimer film matrislerine entegre edilerek taze ürün ambalajlama uygulamalarında yüksek işlevsellik sunmaktadır (Ahmed vd., 2018). Kaewklin ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, domateslerin kalite kaybını azaltmak amacıyla nano-TiO₂ ile desteklenmiş kitosan bazlı etilen tutucu filmler geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, bu filmlerin etilen gazının fotokatalitik degradasyonunu sağlayarak domateslerin saklama süresini uzattığını göstermiştir.

Karbondioksit Tutucular

Karbondioksit (CO₂), belirli koşullarda gıda ambalajlarında yararlı bir atmosfer bileşeni olsa da, aşırı düzeylerde birikmesi hem ambalaj yapısını hem de ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. CO₂ birikimi, kayısı, şeftali, elma ve havuç gibi meyve ve sebzelerde kalite stabilitesini tehdit ederken; kahve kavurma işlemi sırasında açığa çıkan yüksek CO₂ miktarları, ambalajın iç basıncını artırarak yırtılma riskini yükseltmektedir (Drago vd., 2020). Ambalaj atmosferinde CO₂ birikiminin yarattığı bozulma risklerini azaltmak amacıyla, paketlenen sistemlerine CO₂ tutucu materyaller ilave edilmektedir. Poşet şeklindeki bu tutucular; zeolit ve aktif karbon gibi fiziksel emicilerin yanı sıra, granül veya poşet formlarında kullanılan sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi kimyasal adsorbanlar içerebilmektedir. Bunun yanında, kalsiyum oksit

suyla reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit oluşturur; bu bileşik daha sonra CO₂'yi absorbe ederek kalsiyum karbonata dönüştürür ve böylece ambalaj atmosferindeki CO₂ seviyelerini azaltır (Kumar vd., 2024).

Aday ve arkadaşları (2011) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çileklerin kalite özelliklerini korumak amacıyla ambalaj sistemine CO₂ tutucular eklenmiştir. Elde edilen bulgular, bu uygulamanın denge atmosfer koşullarının oluşumunu desteklediğini ve pH, suda çözünür kuru madde ile renk değişimlerinin kontrol örneğine göre daha düşük düzeyde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Nugraha ve arkadaşları (2015) tarafından armutlar üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, CO₂ tutucuların ambalaj içindeki karbondioksit seviyelerini etkin şekilde azalttığı ve bu sayede ürünlerin renk ile tekstür özelliklerinin korunmasına katkı sağladığı rapor edilmiştir.

Antimikrobiyal Aktif Ambalajlama

Tedarik zincirinin çeşitli aşamalarında ortaya çıkabilen mikrobiyal kontaminasyon, gıdaların raf ömrünü olumsuz etkileyerek duyuusal bozulmalardan ciddi sağlık risklerine kadar uzanan sonuçlara neden olur (Ahmed vd., 2018). Bu bağlamda antimikrobiyal aktif ambalajlama, gıda güvenliğini artıran ve raf ömrünü uzatarak israfı azaltan yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, ambalaj malzemesine entegre edilen aktif yayıcılar aracılığıyla antimikrobiyal bileşenlerin kontrollü salımını sağlayarak patojen ve bozulma mikroorganizmalarının gelişimini inhibe eder, nem dengesini optimize eder ve kalite kayıplarını önler (Vasile ve Baican, 2021).

Antimikrobiyal bileşenlerin ambalaj materyallerine dahil edilmesi, antimikrobiyal etkinin uzun süre korunmasını sağlayarak ürünlerin taşınması ve depolanması sırasında mevcut mikroorganizmaların gelişimini veya olası kontaminasyonları engelleyebilmektedir (Quintavalla ve Vicini, 2002). Aktif ambalaj sistemlerinde kullanılan başlıca antimikrobiyal bileşenler arasında susuz asitler, enzimler, bakteriyosinler, organik asitler, parabenler, yağ asitleri, şelat ajanları (EDTA, sitrik asit ve malik asit), laktoferrin gibi polipeptitler, kitosan, antibiyotikler, fenolik bileşikler, uçucu yağlar, nitrit, sülfid, probiyotikler ve polisakkaritler bulunmaktadır (Quintavalla ve Vicini, 2002). Aktif ambalaj uygulamalarında kullanılan ticari antimikrobiyal ürünlere ekstrakt (Nisaplin) , konsantre (AgION LLC, USA) ve film (Microgard) örnek olarak verilebilir. Bunun yanı sıra gümüş katkılı zeolitler ticari olarak üretilmekte olup aktif ambalaj teknolojilerinde en yaygın kullanılan antimikrobiyal

bileşenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Gümüş iyonlarının güçlü antimikrobiyal aktiviteye sahip olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Quintavalla ve Vicini, 2002). Antimikrobiyal gıda ambalaj sistemlerinde kullanılan aktif bileşenler ambalaj materyallerine farklı yöntemlerle entegre edilebilmektedir. Bu yöntemler arasında polimer yüzeylerinin antimikrobiyal maddelerle kaplanması, antimikrobiyal ajanların polimer matrisi içerisine dahil edilmesi, polimer yüzeylerine antimikrobiyal maddelerin immobilize edilmesi ve antimikrobiyal özelliklere sahip polimerlerin doğrudan kullanılması yer almaktadır (Han, 2000). Bu antimikrobiyal bileşenlerin aktif ambalaj sistemlerine entegre edilmesi, gıda ürünlerinde mikrobiyal gelişimin kontrol altına alınmasına katkı sağlayarak gıda güvenliğinin artırılması ve raf ömrünün uzatılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Antimikrobiyal ambalaj sistemlerinde kullanılan yöntemlerden biri, polimer yüzeylerinin antimikrobiyal bileşenlerle kaplanmasıdır. Bu yaklaşımda antimikrobiyal maddeler, ekstrüzyon sonrasında hazırlanan polimer kaplama çözeltisine eklenerek ambalaj filmine uygulanmaktadır. Bu tür sistemlerde ticari olarak en yaygın kullanılan antimikrobiyal bileşenlerden biri Japonya'da geliştirilen gümüş katkılı zeolittir. Zeolit yapısı, gümüş iyonları ile yer değiştirerek geniş spektrumlu antimikrobiyal etki sağlayan çok katmanlı bir yapı oluşturabilmektedir (Coma, 2008). Antimikrobiyal ajanların polimer matrisi içerisine doğrudan eklenmesi, antimikrobiyal ambalaj filmlerinin geliştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Ahmed vd., 2017). Bakteriyosinler, enzimler, şelat ajanları ve organik asitler gibi çeşitli bileşenler kullanılarak antimikrobiyal özellikte ambalaj filmleri üretilebilmektedir (Coma, 2008). Bu bileşenler reçine formundaki ambalaj materyaline doğrudan eklenebileceği gibi koekstrüzyon yöntemiyle oluşturulan çok katmanlı filmlerde belirli katmanlara laminasyon yoluyla da uygulanabilmektedir (Cooksey, 2001). Antimikrobiyal ajanların polimer yüzeylerine iyonik veya kovalent bağlar aracılığıyla immobilize edilmesi aktif ambalaj sistemlerinde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için antimikrobiyal bileşen ve polimer matrisin kovalent bağ oluşturabilecek fonksiyonel gruplar içermesi gerekmektedir (Appendini ve Hotchkiss, 2002). Bazı durumlarda polimer yüzeyi ile biyoaktif madde arasındaki bağlanmayı sağlamak için ara moleküller kullanılabilmektedir (Üçüncü, 2011). Antimikrobiyal özellik taşıyan polimerler, aktif ambalaj sistemlerinde mikrobiyal gelişimin kontrol edilmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Bu polimerlerin yapısındaki pozitif yüklü amin grupları, mikroorganizmaların hücre zarındaki negatif yüklerle etkileşime girerek hücre zarının

bozulmasına ve hücre ölümüne yol açabilmektedir. Kitosan ve poli-L-lisin bu tür antimikrobiyal polimerlere örnek olarak verilmektedir (Fang vd., 2017).

Nisin, pediyosin ve enterosin gibi bakteriyosinler mikroorganizmalar tarafından üretilen doğal antimikrobiyal bileşiklerdir (Ahmet vd., 2017). Bu bileşikler, bazı laktik asit bakterileri (LAB) tarafından sentezlenen ve özellikle Gram pozitif bakterilere karşı etkili olan peptit veya küçük protein yapısındaki antimikrobiyal maddelerdir (Yıldırım vd., 2018). Bakteriyosinler, gıda ürünlerinde mikrobiyal gelişimin kontrol altına alınması ve raf ömrünün uzatılması amacıyla aktif ambalaj sistemlerinde kullanılan doğal antimikrobiyal bileşenler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Chi-Zhang ve arkadaşları (2004) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, L. monocytogenes'e karşı nisin antimikrobiyal etkisi üç farklı model sistemde araştırılmıştır. Nisin sırasıyla yalnızca gıdaya, yalnızca ambalaj materyaline ve hem gıda hem de ambalaj sistemine eklenerek değerlendirilmiştir. Araştırma bulguları, nisin gıda ve ambalaj materyaline birlikte uygulanmasının en etkili yöntem olabileceğini göstermiştir. Petrol bazlı katkı maddelerinin gıda muhafazasında kullanımının sınırlandırılmasına yönelik artan ilgi, doğal koruyucu özellikleri bulunan uçucu yağların ambalaj endüstrisinde antimikrobiyal ajan olarak daha yaygın biçimde kullanılmasına neden olmuştur (Alves-Silva vd., 2013). Bitki kaynaklı ekstraktlar arasında yer alan karanfil, tarçın, kekik, biberiye ve sarımsak gibi bileşenler, et ve et ürünlerinin ambalajlanmasında doğal antimikrobiyal ajanlar olarak kullanılabilmektedir (Feng vd., 2017). Bu bileşiklerin çoğu GRAS (Generally Recognized as Safe) olarak sınıflandırılmakta ve gıda sistemlerinde güvenli kabul edilmektedir (Ruiz-Navajas vd., 2013; Yıldırım vd., 2018). Skandamis ve Nychas (2002) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kekik yağının uçucu bileşenleri ile modifiye atmosfer paketleme (MAP) teknolojisinin birlikte kullanımının taze etlerin kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı MAP koşulları (%40 CO₂/%30 N₂/%30 O₂, %100 CO₂, %80 CO₂/%20 hava, vakum ve hava) uygulanmış ve örnekler 0, 5 ve 10 °C'de depolanarak mikrobiyolojik, fizikokimyasal ve duyu özellikleri değerlendirilmiştir. Uygulamada kekik yağı ekstraktı, PE film içerisine et örneğine temas etmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Sonuçlar, kekik yağının uçucu bileşenleri ile MAP teknolojisinin birlikte kullanımının sinerjistik etki göstererek etlerin raf ömrünü uzattığını göstermiştir. Tarçın yağı, antimikrobiyal ambalajlama sistemlerinde aktif bileşen olarak yaygın şekilde araştırılan uçucu yağlardan biridir (Yıldırım vd., 2018). Wen ve arkadaşları (2016) tarafından

yapılan çalışmada, uçucu yağ kaybını azaltmak amacıyla tarçın yağı β -siklodekstrin ile kompleks oluşturmuş ve elektrospinning yöntemi kullanılarak polilaktik nanofilm yapısına dahil edilmiştir. Doğal kökenli antimikrobiyal polimerler arasında yer alan kitosan ve poli-L-lizin ile birlikte bazı organik asitler ve bunların türevleri, mikroorganizmalara karşı antimikrobiyal ve antifungal aktivite göstermeleri nedeniyle film ve kaplama uygulamalarında kullanılmakta ve aktif ambalaj sistemlerinde ambalaj filmlerine entegre edilebilmektedir (Yıldırım vd., 2018).

Pires ve arkadaşları (2018), taze kümes hayvanı etlerini %2 biberiye veya %2 zencefil esansiyel yağı içeren kitosan/montmorillonit (MMT) nanobiyokompozit filmlerle ambalajlamıştır. Sonuçlar, MMT içeren kitosan filmlerin lipid oksidasyonunu önemli ölçüde azaltarak aerobik mezofilik bakteri ve toplam koliform sayısını %6–16 oranında düşürdüğünü göstermiştir. Nanokil ilavesinin kitosan filmlerin bariyer özelliklerini geliştirerek antimikrobiyal ve antioksidan etkinliği artırdığı belirlenmiştir. Ancak esansiyel yağların raf ömrü üzerinde ek bir etki sağlamadığı bildirilmiştir. Serrano-León ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, fenolik bileşikler bakımından zengin yer fıstığı zarı ve pembe karabiber sanayi atıklarından elde edilen ekstraktlar sırasıyla %0,84 ve %1,90 oranlarında kitosan filmlere dahil edilerek kemiksiz ve derisi alınmış tavuk baget etlerinin ambalajlanmasında kullanılmıştır. 4°C'de 7 günlük

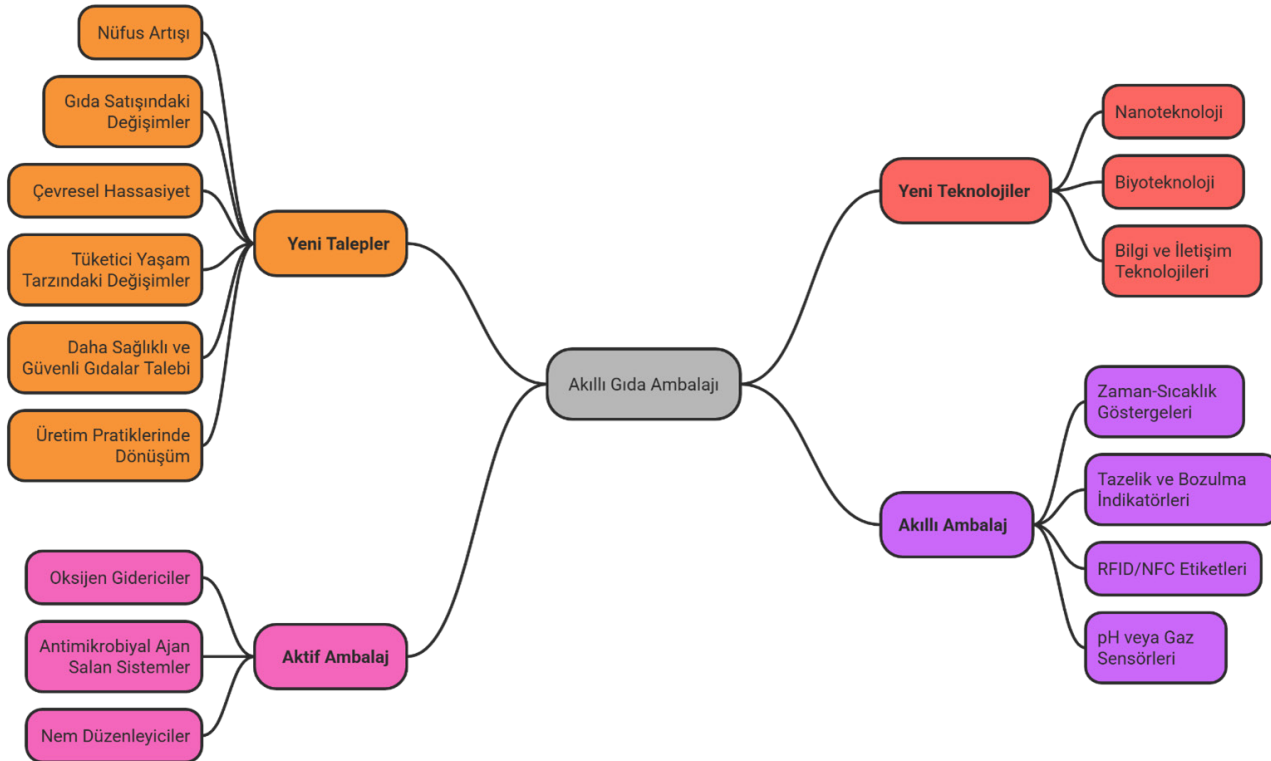
depolama sürecinde her iki ekstraktın da lipid oksidasyonunu kontrol etmede sentetik antioksidan BHT kadar etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca mezofilik bakteri sayısında kontrol grubuna göre önemli bir değişim gözlenmezken, psikrotrofik bakteri sayılarının aktif ambalaj uygulamasında daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Li ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada, ZnO nanopartikülleri antimikrobiyal özellik kazandırmak amacıyla polilaktik asit matrisine dahil edilmiştir. Bu ambalaj materyalinin taze kesilmiş elmalar üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonuçlar, ürünün sertlik, toplam fenolik içerik ve renk özelliklerini koruduğunu, ayrıca toplam bakteri ile mayaküf sayısını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir.

Akıllı Ambalajlama Teknolojisi

Akıllı ambalaj uygulamaları, ürünün raf ömrü boyunca maruz kaldığı sıcaklık, nem ve ışık gibi fiziksel; kimyasal ve mikrobiyolojik değişimlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayarak kalite geçmişinin izlenebilirliğini artırmakta ve kritik kontrol noktalarında kalite parametrelerinin etkin biçimde takip edilmesini mümkün kılmaktadır. Akıllı ambalaj malzemeleri, gıda kalite güvencesi ve güvenlik yönetiminin iyileştirilmesinde kritik bir rol üstlenirken, Çizelge 2'deki tablo bu teknolojilerin tüketici beklentileri ile gelişmiş ambalajlama yaklaşımları arasında işlevsel bir köprü oluşturduğunu göstermektedir (Chen vd., 2020).

Çizelge 2. Akıllı Ambalajlama: Tüketici gereksinimlerinin ileri teknolojilerle bütünleştirilmesi

Table 2. Smart packaging: integration of consumer requirements with advanced technologies



Akıllı ambalaj, bünyesinde barındırdığı sensör, indikatör ve izleme sistemleri aracılığıyla etkileşimli fonksiyonlar sunan en gelişmiş ambalajlama sınıfı olarak tanımlanmaktadır (Drago vd., 2020). Bu teknolojiler; pH, sıcaklık, nem ve gaz kompozisyonu gibi çevresel değişkenleri izleyerek gıda kalitesi, tazelığı ve güvenliği hakkında eşzamanlı veri üretmektedir (Mohammadian vd., 2020).

Akıllı ambalaj, ürünün paketlenmiş durumdayken kalite değişimlerini izleyen ve taşımadan depolamaya, dağıtımdan raf koşullarına kadar süreç boyunca meydana gelen değişiklikler hakkında bilgi sağlayan bir teknolojik sistemdir (Alam vd., 2021). Ürünün duyuşal niteliklerini doğrudan etkilemez; aksine iç ortam koşullarını izleyerek ürünün kalite ve güvenlik durumuna yönelik sinyaller üretir ve bunları tüketiciye iletir. Literatürde pH değişimlerini, mikrobiyal aktiviteyi, zaman-sıcaklık dalgalanmalarını ve tazelik durumunu gösteren film uygulamalarına sıkça rastlanmaktadır (Costa vd., 2020; Mohammadinejad vd., 2020; Ran vd., 2022; Rai vd., 2023). Bu yapı sayesinde akıllı ambalaj, kalite değişimlerinin özellikle renk değişimleri yoluyla kolaylıkla gözlemlenebilmesine olanak tanıyarak ürün bilgisi aktarımını güçlendirir.

Akıllı ambalajlama, kimyasal sensörler, biyosensörler, gaz indikatörleri ve optik dedektörler gibi akıllı bileşenlerin etiket yapısı üzerinden ambalaj materyaline entegre edilmesi veya gıda yüzeyine yakın konumlandırılmasıyla geliştirilen, ürünün durumuna ilişkin çevresel ve biyokimyasal değişimleri gerçek zamanlı olarak izleyebilen bir teknolojik sistemdir. Bu sistem, bozulma risklerini ve güvenlik tehditlerini erken aşamada saptayarak hem üreticilere operasyonel avantaj sağlamakta hem de tüketicilerin güvenilir ürünlere erişimini artırmaktadır (Hepsağ ve Varol, 2018). Geleneksel etiketlerde belirtilen son kullanma tarihleri, ürünün raf ömrü boyunca maruz kaldığı sıcaklık, nem ve mikrobiyal yük gibi değişken ortam koşullarını dikkate almaması nedeniyle gerçek tazelik statüsünü güvenilir şekilde yansıtamamaktadır. Buna karşılık, sensör entegreli “akıllı son kullanma tarihi” etiketleri, görsel indikatörler ve QR kod tabanlı bilgi sistemleri aracılığıyla gıdanın kalite parametrelerini gerçek zamanlı olarak izleyerek daha doğru ve dinamik bir tazelik değerlendirmesi sağlamaktadır. Bu akıllı izleme sistemleri; sıcaklık, nem ve mikrobiyal bozulma potansiyeline ilişkin çevresel değişkenleri kesintisiz olarak kaydederek, gıdanın gerçek raf ömrünü belirlemede konvansiyonel yöntemlerden daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. Söz konusu etiketlerin

geniş çapta kullanımı, tüketicilerin ürünün güncel kalite durumuna dayalı daha bilinçli tüketim kararları almasını teşvik ederek, tüketilebilir gıdaların gereksiz yere elden çıkarılmasını önleyebilir ve gıda israfının azaltılmasına katkı sağlayabilir (Poyatos-Racionero vd., 2018).

Ticari olarak yaygınlaşan akıllı ambalaj teknolojileri, ürünün depolama, taşınma sürecinde sıcaklık dalgalanmalarını ve son tüketim tarihine yaklaşımı renk değişimleri aracılığıyla görselleştiren etiket sistemleri ile ambalaj içi atmosferdeki gaz bileşimlerini ve mikrobiyal çoğalmayı algılayan indikatörleri kapsamaktadır (Ahvenainen, 2003). Akıllı ambalaj teknolojilerinde kullanılan başlıca bileşenler, ürünün depolama ve taşımacılık sürecinde sıcaklık ve zaman etkilerini kaydeden zaman-sıcaklık göstergeleri (TTI), tazelik durumu ve kalite parametrelerini renk değişimi ile görselleştiren indikatörler, lojistik süreçlerin yönetiminde kullanılan barkod sistemleri ve ürünlerin benzersiz tanımlanmasını sağlayan Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID) platformlarını kapsamaktadır. Bu bileşenler, hem kalite yönetimi hem de tedarik zinciri izlenebilirliği açısından entegre bir çözüm sunmaktadır. Akıllı ambalajlama sistemlerinin sınıflandırılması Çizelge 3'te yer almaktadır.

Akıllı ambalajlardaki en önemli yeniliklerden biri, aktif ve akıllı işlevlerin tek bir ambalaj sisteminde bütünleştirilmesidir. Örneğin, güçlü bir antimikrobiyal ajan olarak bilinen ZnO, pH değişimlerine bağlı olarak renk değiştiren antosiyanin içeren pH-duyarlı filmlerle birlikte kullanılmıştır (Koshy vd., 2023). Bu tasarımda ZnO mikrobiyal gelişimi engellerken, antosiyanin gıda bozulmasına ilişkin hızlı bir görsel uyarı sağlamaktadır. Akıllı ambalaj teknolojisi, gerçek zamanlı kalite izleme ve uzatılmış raf ömrü sunarak hem gıda güvenliğini güçlendirmekte hem de israfı azaltarak geleneksel ambalaj sektöründe devrim yaratma potansiyeli taşımaktadır.

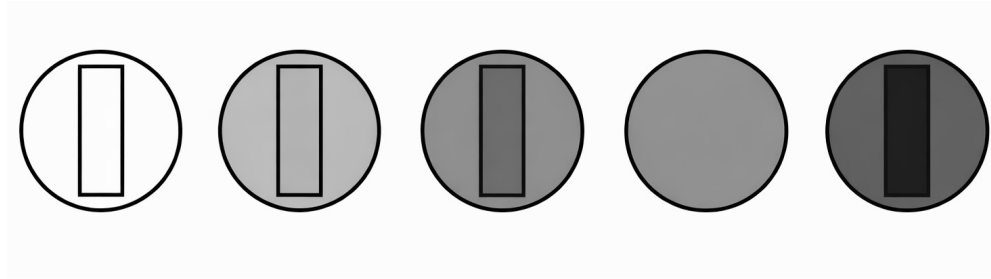
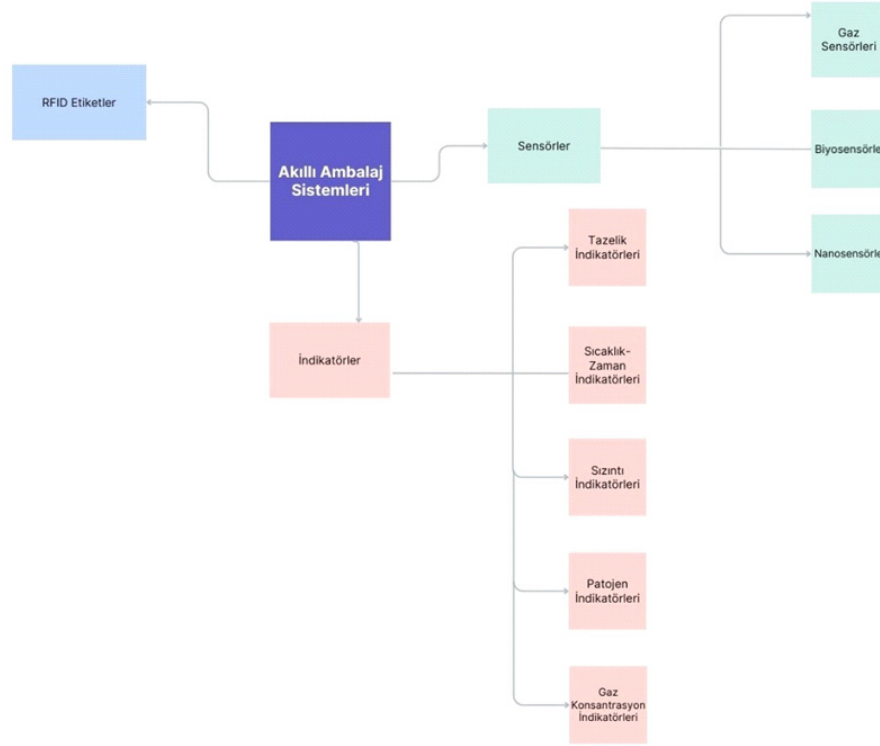
Zaman-Sıcaklık İndikatörleri

Zaman-sıcaklık göstergeleri (TTI), gıdaların depolama ve dağıtım sırasında maruz kaldığı sıcaklık-süre profilini kaydeden ve görselleştiren sensör tabanlı sistemlerdir. Bu sistemler, ürünün raf ömrünü, tazelik durumunu ve potansiyel kalite kayıplarını objektif olarak değerlendirmeye imkân tanımakta, tedarik zinciri boyunca güvenli ve kontrollü ürün yönetimi sağlamaktadır. Zaman-sıcaklık göstergeleri (TTI), depolama ve taşıma sırasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinin ürün raf ömrü ve kalite parametreleri üzerindeki doğrudan etkisi sebebiyle, bozulabilir

gıdaların kalite ve güvenlik değerlendirmesinde kritik bir işlev üstlenmektedir. İşlevsel mekanizmalarına göre difüzyon bazlı, enzimatik, fotokromik veya polimer tabanlı TTT'lar geliştirilmiş olup, ambalaj sistemlerine entegre edildiğinde ürünün sıcaklık geçmişi görsel veya dijital biçimde kaydedilmektedir. Bu teknoloji, tedarik zincirinde kalite güvencesinin artırılması,

sıcaklık kaynaklı risklerin yönetilmesi ve verilerin analiz edilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Özçandar ve Yetim, 2010). Şekil 1'de görüldüğü üzere, dikdörtgen şeklinin renginin daire şeklinden daha açık olması, ürünün uygun sıcaklık koşullarında ve önerilen depolama süresi boyunca muhafaza edildiğini ifade etmektedir.

Çizelge 3. Akıllı ambalajlama sistemleri
Table 3. Smart packaging systems



Şekil 1. Zaman-sıcaklık indikatör örneği (Öksüztepe G., Beyazgül P., 2015).

Figure 1. Example of a time-temperature indicator (Öksüztepe, G., & Beyazgül, P., 2015)

Dikdörtgen şeklinin renginin daire şeklinden daha açık olması, ürünün uygun sıcaklık koşullarında ve önerilen depolama süresi boyunca muhafaza edildiğini ifade etmektedir.

The lighter color of the rectangular shape compared to the circular shape indicates that the product has been stored under appropriate temperature conditions and within the recommended storage period.

Bu indikatör sistemleri, çevresel parametrelere karşı yüksek hassasiyet gösterir ve ürünlerin uygunsuz sıcaklık koşullarına maruz kalması durumunda, ambalaj içindeki mekanik, kimyasal, enzimatik veya mikrobiyal değişimlerin etkisiyle etiket yüzeyinde gözlemlenen renk değişiklikleri aracılığıyla kullanıcıyı bilgilendirir. Bu özellik, tedarik zincirinde kalite kontrol, sıcaklık yönetimi ve ürün güvenliğinin etkin bir şekilde sağlanmasına imkân tanımaktadır. Genellikle yapışkan özelliğe sahip tasarlanmış olan bu indikatör etiketler, hem taşıma konteynerleri hem de bireysel gıda ambalajlarına entegre edilebilmektedir. Soğuk zincir lojistiğinde, özellikle düşük sıcaklıklarda bozulma riski taşıyan soğutulmuş ve dondurulmuş gıdaların depolama ve dağıtım süreçlerinde sıcaklık ihlallerinin izlenmesini mümkün kılmakta ve ürün raf ömrü, kalite güvence ve tedarik zinciri yönetimi açısından kritik bir erken uyarı fonksiyonu sağlamaktadır (Riva vd., 2000; Taoukis ve Labuza, 2003; Gök, 2007).

Uygulamaya örnek olarak sıcaklığa duyarlı içecekler için kullanılan sıcaklığa duyarlı ambalaj sistemleri verilebilir. Bu sistemler genellikle sıcaklık değişimlerine duyarlı pigment veya mürekkep içeren etiket ve kapak materyallerinden oluşmaktadır. Ortam sıcaklığındaki artış veya azalış, pigmentin rengini değiştirerek tüketiciye ürünün taşınma ya da depolama sürecinde uygun sıcaklıkta kalıp kalmadığını gösteren görsel bir sinyal sağlar. Bu teknoloji, tüketicilerin içeceğin tazeliğini ve uygun sıcaklıkta korunup korunmadığını kolaylıkla değerlendirmesine imkân tanır ve sıcaklık dalgalanmalarının neden olduğu kalite kayıplarını azaltır (Anonim, 2010a).

Tazelik İndikatörleri

Tazelik indikatörleri; ambalajın açılmasına ihtiyaç duyulmaksızın, gıda matrisinde meydana gelen biyokimyasal ve mikrobiyal değişimlere karşı duyarlı tasarlanmış olup, kalite durumuna ilişkin nitel veya yarı nicel geri bildirim sağlamaktadır. Bu işlevsel göstergeler, tüketicilerin gıda kalitesine yönelik algısını güçlendirirken, aynı zamanda kalite doğrulama süreçlerinde bilimsel veri temelli bir değerlendirme sunmaktadır.

Tazelik indikatörleri fonksiyonel yapıları açısından iki grupta değerlendirilmektedir: doğrudan tepki veren indikatörler ve çevresel değişime dayalı dolaylı indikatörler. Doğrudan indikatörler, bozulma sürecine özgü metabolit veya toksinlerin varlığına selektif olarak yanıt verirken; dolaylı indikatörler, depolama boyunca gerçekleşen mikrobiyal gelişim veya kimyasal reaksiyonların neden olduğu ortam koşullarındaki ikincil değişimleri algılamaktadır. Tazelik indikatörleri, depolama sırasında gıda matrislerinde veya ambalaj içi atmosferde gerçekleşen kimyasal dönüşümler ve mikrobiyal metabolizma sonucu oluşan çeşitli bileşiklerin (CO₂, SO₂, NH₃, aminler, H₂S, organik asitler, etanol ve benzeri metabolitler) kantitatif veya yarı-kantitatif olarak izlenmesi prensibiyle çalışan sensör sistemleridir (Gök, 2007; Smolander, 2003). Bu indikatörler, ambalaj yüzeyine entegre edildiklerinde, ortamdaki gaz bileşimi değişimlerinin renk değişimi gibi kolay algılanabilir sinyallerle dışarıya aktarılmasını sağlar.

Tazelik indikatörleri, operasyonel mekanizmaları temel alınarak dört ana kategori altında sınıflandırılmaktadır: gıdanın bozulma sürecinde ortaya çıkan asidik veya bazik metabolitlere bağlı ortam pH değişimlerine duyarlı kromojenik indikatörler, protein degradasyonu sonucu oluşan uçucu azotlu bileşiklere (TVB-N, TMA vb.) seçici yanıt veren sensör sistemleri, sülfür içeren metabolitlerin (H₂S) varlığıyla aktive olan sülfür-duyarlı renk değişimi esaslı indikatörler ve mikrobiyal büyüme sırasında ortaya çıkan karakteristik metabolitleri algılayan biyosensör veya kimyasal sensör temelli indikatör sistemleri (Gök, 2007; Smolander, 2003).

Khezerlou ve ark. (2023), döküm yöntemi aracılığıyla *Hibiscus sabdariffa* L. kaynaklı antosiyanini bir tazelik indikatörü olarak kitosan matrisine entegre ederek yenilikçi nitelikte akıllı film materyalleri elde etmişlerdir. Üretilen bu kolorimetrik kitosan filmleri, amonyak gazı varlığı ve pH değişimleri karşısında belirgin renk değişimleri göstererek balık tazeliğinin depolama süresince izlenmesine imkân tanımıştır. Tazelik indikatör örnekleri Şekil 2'de belirtilmiştir.



Şekil 2. Tazelik indikatör örnekleri (Anonim, 2007)

Figure 2. Examples of freshness indicators (Anonim, 2007)

Neme duyarlı ambalaj sistemleri üç temel mekanizma üzerine kuruludur:

1. Nemi absorbe ederek ambalaj yapısının gevşemesine yol açan ve böylece sızdırmazlık seviyesini düşürüp gıdanın neme bağlı bozulmasını engellemeye katkı sağlayan higroskopik malzemeler;
2. Ortam neminin azalması durumunda nem salarak ambalajın sıklığını artıran ve daha etkili bir bariyer oluşturan malzemeler;
3. Ambalaj içi ve çevresindeki nem seviyelerini sürekli takip eden ve ambalaj performansını bu doğrultuda optimize eden nem sensörleri (Xu vd., 2025).

Neme duyarlı ambalajlama teknolojilerinde yaygın olarak jelatin veya nişasta temelli higroskopik polimerlerden yararlanılmaktadır. Bu polimerler, nem koşullarının değişmesiyle fiziksel ya da kimyasal modifikasyonlara uğrayarak ambalajın yapısal ve fonksiyonel özelliklerinde değişime neden olmaktadır (Xu vd., 2025).

Ekmek ve hamur işlerinin raf ömrünü uzatmada nem, ürün kalitesini etkileyen kritik bir parametredir. Neme yanıt veren ambalajlar, düşük nem ortamlarında ekmeğin aşırı kurumasını önleyerek yumuşaklığını korur; yüksek nem ortamlarında ise hamur işlerinin fazla nem çekmesini engelleyerek özgün tat ve dokularını muhafaza eder. Bu etki, nem duyarlı polimerlerin değişen bağıl neme bağlı olarak fiziksel yapılarını değiştirmeleri sayesinde gerçekleşir. Örneğin, karboksimetil selüloz (CMC) ile kaplanmış selüloz lifli bir taban ve sodyum nitrat gibi bir metal tuzu içeren ambalaj sistemi, ekmeğin ve hamur işi paketlerinde iç nem düzeyini düzenleyebilir. CMC'nin nem tutma, metal tuzunun ise nem salma kapasitesi, paketin açılmasından sonra dahi belirli bir nem seviyesinin korunmasını mümkün kılar (Salama ve Aziz, 2024).

Meyve ve sebzelerin korunmasında neme duyarlı ambalajlar, ortam nemini düzenleyerek su kaybı hızını azaltabilir ve böylece ürünlerin tazeliğini ve besin değerini korur. Ayrıca, düşük nem koşullarında muhafaza edilmesi gereken sebzeler için ambalaj içi-dışı nem farkını ayarlayarak nem düzeyini düşürür ve raf ömrünü uzatır. Örneğin, nanolif tabanlı, hem neme hem de pH değişikliklerine yanıt verebilen akıllı antimikrobiyal bir ambalaj sistemi geliştirilmiş olup, bu sistem antimikrobiyal bileşenleri çevresel koşullara bağlı olarak serbest bırakarak çileklerin raf ömrünü önemli ölçüde artırmıştır (Jiao vd., 2024).

Baharat ve toz ürünlerin stabilite ve taşınabilirliği açısından nem, kritik bir çevresel parametre olarak öne çıkmaktadır. Neme duyarlı ambalaj sistemleri, bu ürünlerin nem absorpsiyonu ve topaklanmayı engelleyerek hem akışkan yapılarını hem de kalite özelliklerini muhafaza etmektedir. Bu mekanizma, higroskopik polimerlerin nemi adsorbe etme ve gerektiğinde desorbe etme kapasitelerinden kaynaklanmaktadır.

Biyosensörler

Codex Alimentarius Komisyonu (CAC) ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından tanımlandığı üzere gıda izlenebilirliği, bir ürünün üretimden dağıtım, işleme ve yem aşamasına kadar gıda zinciri boyunca geçirdiği sürecin izlenmesi ve takip edilmesi yeteneğini ifade etmektedir. Benzer şekilde Amerikan Üretim ve Envanter Kontrol Derneği (APICS) gıda izlenebilirliğini gıda güvenliğinin sağlanmasındaki kritik rolü açısından tanımlamaktadır (Esteghlal vd., 2018). Son yıllarda biyosensör teknolojilerindeki gelişmeler doğrultusunda akıllı gıda izlenebilirlik sistemlerine olan ilgi artmış ve bu sistemler araştırmacılar için önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir (Meliana vd., 2024). Bununla birlikte, bu teknolojilerin gıda güvenliği ve izlenebilirlik süreçleri üzerindeki etkilerinin bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Akıllı gıda izlenebilirliğinin temel prensipleri, gıda ürünleri hakkında hızlı, doğru ve kapsamlı veri elde edilmesini sağlayan taşınabilir sensörler ve göstergelerin kullanımına dayanmaktadır (Huang ve Fu, 2023). Bu sensör ve göstergeler, gıda zinciri boyunca ürünlerin izlenebilirliğini artırarak potansiyel gıda güvenliği risklerinin erken tespit edilmesine olanak sağlamaktadır.

Biyosensörler, ambalajlı gıda sistemlerinde meydana gelen biyokimyasal reaksiyonları algılayan, bu reaksiyonları ölçülebilir elektriksel, optik veya kimyasal sinyallere dönüştüren ve ileten analitik cihazlardır (Smolander, 2003; Yam vd., 2005; Otles ve Yalçın, 2008). Bu sistemlerin temelini, hedef molekül ile özgül şekilde etkileşim kuran biyoreseptör birimi ve söz konusu biyokimyasal tanıma olayını nicel bir sinyale dönüştüren transducer bileşeni oluşturmaktadır. Biyoreseptör bileşenleri, enzimler, antijenler, hormonlar, antikolar ve nükleik asit dizileri gibi yüksek özgüllük gösteren biyolojik makromoleküllerden oluşmakta olup hedef analiti seçici biçimde tanımlamaktadır. Transdüksiyon birimi ise elektrokimyasal, optik, piezoelektrik

veya kalorimetrik prensiplerle çalışan sensör platformlarından meydana gelmekte ve biyoreseptör tarafından başlatılan biyokimyasal tanıma olayını ölçülebilir elektriksel sinyallere dönüştürmektedir (Smolander, 2003; Yam vd., 2005). Zhang ve arkadaşları (2020), blok zinciri destekli veri yönetiminin akıllı sensörlerle birlikte kullanılmasının, ürünün tedarik zincirindeki hareketlerinin değiştirilemez biçimde kaydedilmesini sağlayarak şeffaflığı, izlenebilirliği ve tüketici güvenini artırdığını bildirmektedir. Öte yandan Wani ve Patidar (2025), sensör tabanlı teknolojilerle entegre edilen makine öğrenimi algoritmalarının potansiyel gıda güvenliği risklerini öngörme ve izlenebilirlik

mekanizmalarını güçlendirme kapasitesini incelemiştir. Food Sentinel System™ (FSS) patojen indikatörüne ait örnek kullanım Çizelge 4'te verilmiştir. Biyosensörler, paketlenmiş kuruyemişlerde aflatoksin tespiti amacıyla kullanılmış ve 0.1 µg/kg gibi oldukça düşük tespit limitlerine ulaşılmıştır; bu değer düzenleyici sınırların oldukça altındadır (Escobar vd., 2023). Bu durum, biyosensör teknolojilerinin gıda zinciri boyunca kontaminantların erken tespitine katkı sağlayarak gıda güvenliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4. Food Sentinel System™ (FSS) patojen indikatörü (Kerry vd., 2006)

Table 4. Food Sentinel System™ (FSS) pathogen indicator (Kerry et al., 2006)

SAFE PRODUCT

Bar Code Food Safety Label

Safe Food Handling Instructions

-  Keep refrigerated or frozen.
-  Wash working surfaces (including cutting boards), utensils, and hands after touching raw meat or poultry.
-  Cook thoroughly.
-  Keep hot foods hot. Refrigerate leftovers immediately or discard.

FOOD SENTINEL SYSTEM: To assure safe handling, this package is being automatically monitored for proper refrigeration and shelf life by time and temperature-sensitive barcodes. Abused product can also be visually identified by an extra wide, colored bar in the lower bar code.



Tare	Store No.	Sell By
Net wt/ct	Unit Price	Total Price

Patojen İndikatörleri

Patojen indikatörler, gıda ürünlerine sonradan bulaşabilen ve ciddi derecede sağlık riski taşıyan patojen mikroorganizmaların varlığını belirlemek amacıyla kullanılan, sensör tabanlı izleme etiketleri olarak tanımlanmaktadır (Smolander, 2003). Bu indikatörler, patojenik kontaminasyonun erken uyarı mekanizmasını oluşturarak gıda güvenliğinin sürdürülmesinde önemli bir araçtır. Polietilen tabanlı ambalaj yüzeylerine entegre edilen bu indikatör etiketler, *Salmonella* sp., *Campylobacter* sp., *E. coli* O157 ve *Listeria* sp. gibi yüksek riskli patojen mikroorganizmaların varlığını algılamak üzere tasarlanmıştır. Patojen kontaminasyonu durumunda, yüzeye immobilize edilmiş spesifik antikorlar hedef mikroorganizmalarla etkileşime girerek, ambalaj üzerinde gözle görülebilen bir optik yanıtın ortaya çıkmasını sağlar.

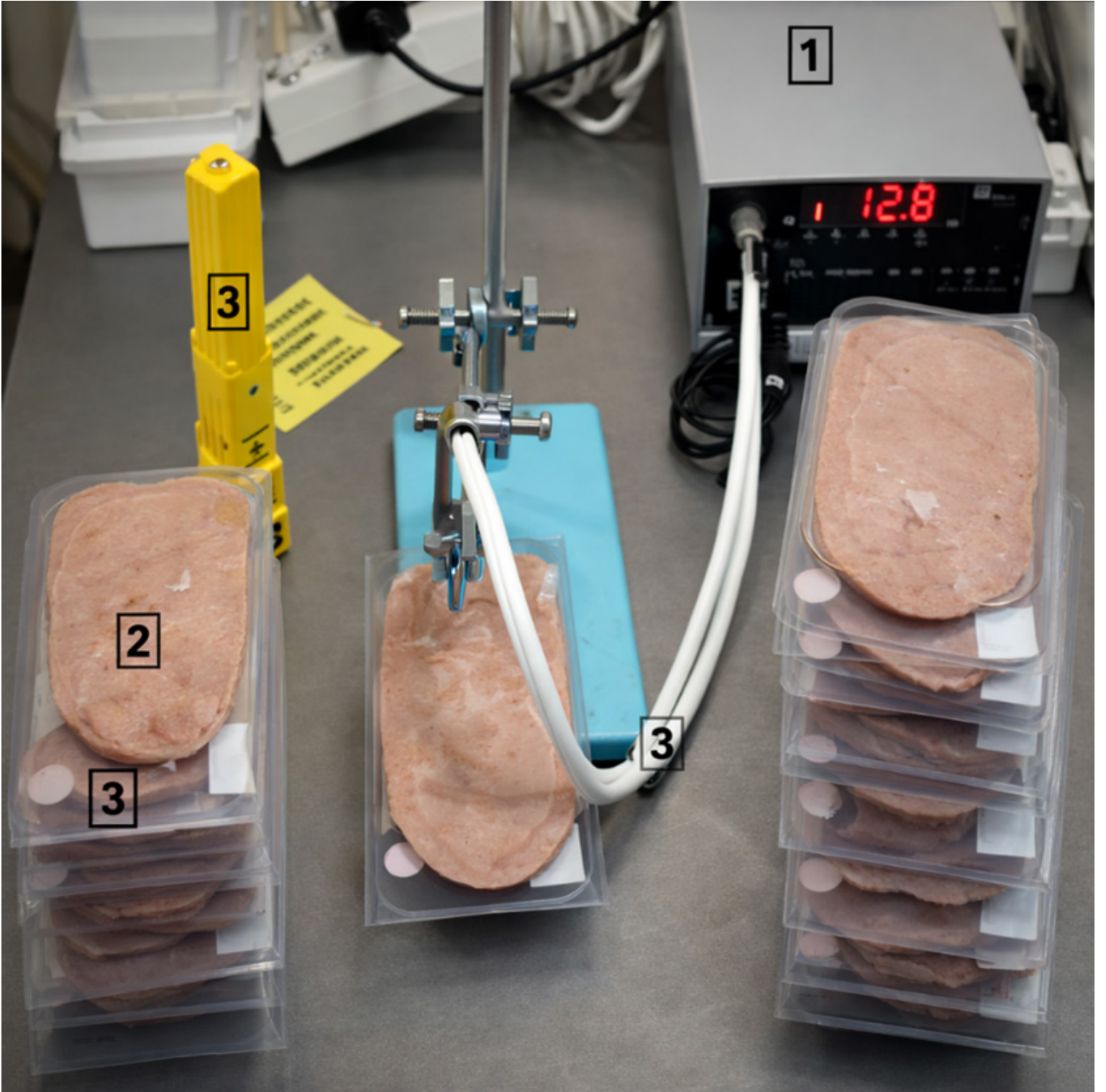
Toxin Alert Inc. tarafından geliştirilen Toxin Guard™ ile Sira Teknoloji tarafından geliştirilen Food Sentinel System™, ticari ölçekte uygulanan önemli patojen indikatör sistemleri arasında yer almaktadır. Bu sistemler, barkodun belirli bir segmentine entegre edilen membran yapı üzerine immobilize edilen antikorların, kontamine bakterilerle immünokimyasal etkileşime girmesi prensibine dayanmaktadır. Reaksiyon sonucunda ilgili barkod bölgesinin koyu renge dönüşerek okunamaz hâle gelmesi, kontamine ürünlerin piyasaya arzını önlemekte ve gıda güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır (Smolander, 2003; Han vd., 2005; Kerry vd., 2006).

Gaz Konsantrasyon İndikatörleri

Depolama sırasında ambalajlı gıdalarda ortaya çıkan metabolik reaksiyonlar veya mikroorganizmaların çoğalma aktivitesi, ambalaj atmosferindeki gazların (örn. CO₂ artışı, O₂ tüketimi, uçucu azotlu bileşiklerin oluşumu) zamana bağlı olarak değişmesine neden olur. Bu atmosferik değişimler, ürün tazeliğinin izlenmesi ve bozulma mekanizmalarının değerlendirilmesi için yüksek duyarlılığa sahip dolaylı kalite göstergeleri olarak kullanılmaktadır. Ambalaj yapısına entegre edilen gaz sensörleri, tepe boşluğu atmosferinin zaman-sıcaklık koşullarına bağlı olarak değişen bileşimini gerçek zamanlı olarak izleyebilmekte ve O₂, CO₂, NH₃ gibi primer gazların yanı sıra H₂S, dimetil sülfür, metan, hidrojen, organik asitler ve çeşitli uçucu organik bileşenlerin kantitatif ya da yarı-kantitatif düzeyde belirlenmesini sağlayarak ürünün bozulma dinamiklerinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Yam vd., 2005).

Gıda ambalajlarında uygulanan gaz kolorimetrik indikatörler, çevresel parametrelerdeki (sıcaklık, bağıl nem, pH) veya hedef gaz konsantrasyonlarındaki dalgalanmalara duyarlı olup, bu değişimleri spesifik bir kromatik yanıtla görselleştiren analitik sensör sistemleridir. Bu bileşenler, ambalaj atmosferi ya da ürün yüzeyinde gerçekleşen kimyasal ve fiziksel süreçlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede tüketiciler, ürünün tedarik zinciri boyunca uygunsuz sıcaklık koşullarına maruz kalıp kalmadığını, bozulma süreçlerine ilişkin kimyasal veya mikrobiyolojik göstergeler sergileyip sergilemediğini ya da ambalaj bütünlüğünde meydana gelebilecek herhangi bir fiziksel hasarı kolaylıkla değerlendirebilmektedir (Siciliano vd., 2025).

Günümüzde akıllı ambalaj uygulamalarında kullanılmak üzere pH duyarlılığına sahip kolorimetrik sensörlerin tasarımına yönelik çalışmalar önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu sensörler, biyolojik olarak parçalanabilir polimer yapılarla pH değişimlerine selektif yanıt veren boyaların kombinasyonu sonucu elde edilmekte ve gıdalardaki bozulma süreçlerine eşlik eden pH değişimlerini renk değişimi şeklinde görselleştirmektedir. Akıllı ambalaj sensörlerinin üretiminde tercih edilen polimerler, çevre dostu, toksik olmayan, biyobozunur ve geri kazanılabilir niteliklere sahip malzemelerden oluşmaktadır; polisakkaritler, proteinler, zamlar, jelatin ve polivinil alkol bu kategoriye örnek olarak verilebilir. Sentetik pH indikatörlerin kullanımı ise, olası toksisite ve genotoksik etkiler nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Modifiye atmosfer ambalaj uygulamalarında kullanılan gaz konsantrasyon indikatörleri, ambalaj içi oksijen varlığını ve bu gazın konsantrasyonundaki dalgalanmaları izlemeye yönelik kolorimetrik veya redoks-aktif sensör platformlarıdır (Li vd., 2021). Ageless-Eye® ticari oksijen göstergeleri, ambalaj sızdırmazlığının bozulması sonucu ambalaj atmosferine difüze olan oksijenin tespiti için geliştirilmiştir. Sensör, ortamdaki O₂ seviyesine bağlı olarak renk geçişi gösterir; %0.1'in altındaki konsantrasyonlarda pembe renk, %0.5'in üzerindeki değerlerde mavi renk gözlenir. Vitalon® ve Samsu-Checker® indikatör sistemleri de benzer bir kolorimetrik oksijen duyarlılık prensibiyle işlev göstermektedir (Robertson, 2006; Otles ve Yalçın, 2008). Gaz sensörü ve optik oksijen sensörlerine ait görseller sırasıyla Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Gaz sensörü (Han, 2000)

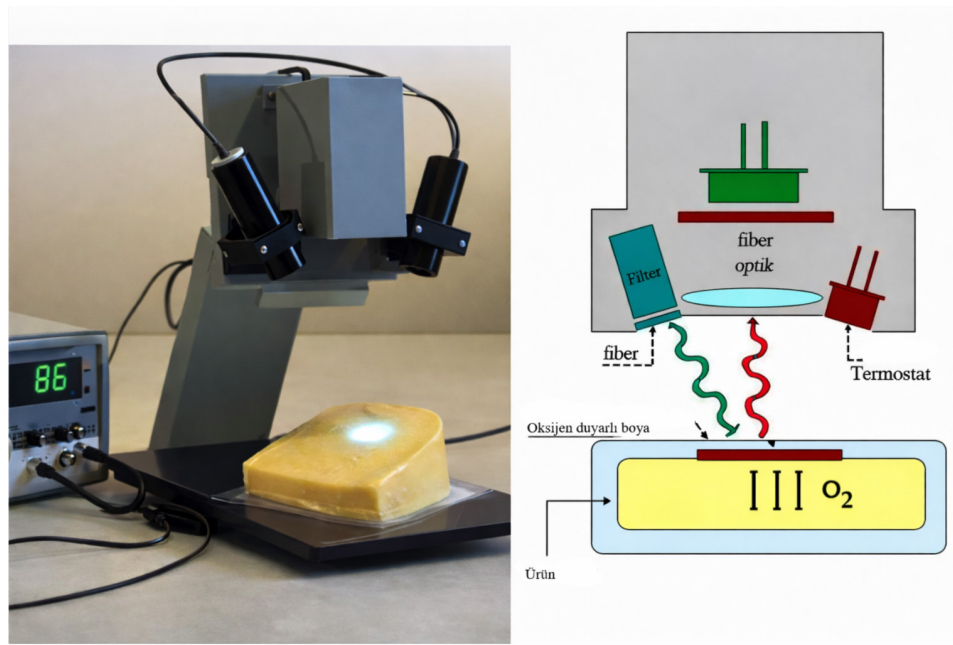
Figure 3. Gas sensor (Han, 2000)

Gazlara karşı duyarlı ambalaj malzemeleri, gaz geçirgenlik hızını kontrol ederek gıdanın bulunduğu mikro ortamı düzenleyebilir. Bu malzemelerin çalışma prensibi, paket içi nem dengesinin sağlanmasında önemli rol oynayan su moleküllerinin adsorpsiyon ve desorpsiyonuna dayanır. Gıdanın korunmasında suyun yapısında tutulması kritik olduğundan, gaz duyarlı ambalajlarda genellikle suyu çekebilen ve gerektiğinde serbest bırakabilen polimerik yapılar tercih edilir. Bu materyaller suyla temas ettiğinde hızlı bir tepki oluşturur; bu tepki fiziksel özelliklerdeki (örneğin renk veya şekil) değişimlere ya da hidroliz ve çapraz bağlanma gibi kimyasal süreçlere dönüşebilir. Ortaya çıkan bu değişimler ambalaj yapısının fonksiyonlarını etkileyerek nem kontrolünü sağlar ve ürünün tazeliğinin korunmasına katkıda bulunur. Böyle bir ambalaj malzemesi gıda çevresinden su moleküllerini adsorbe ederek paketin içindeki bağıl nemi düşürebilir ve aşırı nemin neden olacağı bozulmayı önleyebilir (Xu vd., 2025).

Gaza duyarlı ambalaj malzemeleri arasında hidroksiselüloz, jelatin, nişasta, metal oksitler, kollajen ve PDLC malzemeler (polimer dağılımlı sıvı kristal sistemler) sayılabilir. Hidroksiselüloz, çevresel nemi adsorbe ederek yapısının dielektrik sabitinde değişiklik meydana getirir (Cai ve Zhang, 2021; Wonder vd., 2020). Jelatin veya nişasta temelli malzemeler, yüksek nem düzeylerinde ekmeğin kuruyarak sertleşmesini önleyerek yumuşaklığını sürdürmesini sağlar; düşük nem ortamlarında ise hamur işlerinin aşırı nem absorpsiyonu sonucu duysal ve tekstürel kayıplara uğramasını engelleyerek kalite özelliklerini korur (Abedi-Firoozjah vd., 2025). Metal oksit

yarı iletkenlerde, ortam nemindeki dalgalanmalar malzemenin elektriksel direncinin değişmesine yol açmaktadır (Fu ve Dudley, 2021). Kolajen, su moleküllerini farklı düzeylerde adsorbe edebilmekte ve bu adsorpsiyon kapasitesindeki değişim, moleküler konformasyonunun değişmesine neden olmaktadır (Min vd., 2022). PDLC sistemlerinde, nem düzeyindeki değişimlere bağlı olarak sıvı kristal molekülleri su moleküllerine duyarlı hâle gelir ve bunun sonucunda sıvı kristal tabakanın optik özellikleri değişir (Pang vd., 2024).

Gıda endüstrisinde gaz duyarlı ambalajlama malzemeleri, paket içindeki oksijen ve karbondioksit düzeylerini kontrol ederek et ve deniz ürünlerinde oksidasyon ve bozulmayı geciktirerek raf ömrünü uzatır. Süt ve süt ürünlerinde ise oksidatif bozulmayı engellemek için ambalaj malzemelerine entegre edilerek oksijen geçiş hızını kontrol eder. Bu teknoloji aynı zamanda kahve ve kahve çekirdeklerinin ambalajlanmasında da kullanılmaktadır (Xu vd., 2025). Bu ürünlerde ambalaj içindeki oksijen ve karbondioksit seviyelerini optimize ederek kahvebin taze aromasını korumaktadır. Ageless-Eye® oksijen indikatörünün şematik gösterimi Şekil 4'te yer almaktadır. Fırıncılık ürünlerinde modifiye atmosfer paketleme (MAP) üzerine yapılan bir çalışmada, gaz sensörlerinin karbondioksit seviyelerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağladığı ve bu sayede raf ömrü tahmin doğruluğunun %20 oranında arttığı bildirilmiştir (Garg vd., 2022). Bu bulgular, sensör tabanlı ambalaj teknolojilerinin gıda ürünlerinin kalite değişimlerinin izlenmesinde ve gıda güvenliği açısından önemli verilerin elde edilmesinde etkili bir araç olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Optik oksijen sensörleri (Ahvenian, 2003)

Figure 4. Optical oxygen sensors (Ahvenian, 2003)

Amonyak ve Amin Sensörleri

Yüksek proteinli gıdalar olan et, balık, süt ve yumurta ürünlerinde mikrobiyal ve kimyasal bozulmanın en karakteristik göstergelerinden biri, toplam uçucu bazik azot (Total Volatile Basic Nitrogen, TVBN) bileşenlerinin varlığıdır. Bu bileşenler arasında amonyak (NH₃) ve çeşitli biyojenik aminler; trimetilamin, dimetilamin, histamin, putresin, kadaverin yer almakta olup, bu metabolitlerin konsantrasyonu, söz konusu gıdaların tazelik derecesi ve bozulma seviyesinin önemli bir belirleyicisidir. Uçucu bazik bileşikler, özellikle bakteri ve mantar türlerinin amino asitleri deaminasyon ve diğer proteolitik metabolik reaksiyonlara uğratması sonucunda ortaya çıkar (Lv vd., 2024; Zakaria vd., 2022). Ortaya çıkan uçucu aminler, gıda matrisinde çürük ve keskin kokuların oluşmasına yol açarak sadece tazelik kaybını göstermekle kalmaz, aynı zamanda tüketici sağlığı açısından potansiyel toksikolojik riskler barındırır (Danchuk vd., 2020). Amonyak ve çeşitli biyojenik aminlerin tespiti için geliştirilmiş gıda ambalaj sensörleri, söz konusu uçucu gazların varlığını algılayarak hem üretici tarafında kalite kontrol süreçlerini optimize eder hem de tüketiciye ürünün tazeliği ve potansiyel bozulma riskleri hakkında doğrudan geri bildirim sunar (Ashiq vd., 2024; Liu vd., 2024). Hashemian ve arkadaşları (2023), et ürünlerinde meydana gelen bozulmanın uzaktan ve tahribatsız şekilde izlenmesi amacıyla selüloz asetat/metal-organik kafes (MOF) filmine dayalı amonyak kolorimetrik sensörü geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, hem günler arası (RSD = %3.38) hem de gün içi (RSD = %3.86) analizlerde uygun geri kazanım oranları ve kabul edilebilir tekrarlanabilirlik sağlandığını, ayrıca 4 gün boyunca uzun dönem stabilite ve 3 kullanım döngüsü boyunca yeniden kullanılabilirlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, akıllı ambalaj sensörlerinin et ürünlerinde bozulma göstergelerinin izlenmesinde etkili olabileceğini ve gıda güvenliği açısından önemli bir erken uyarı mekanizması sağlayabileceğini göstermektedir. Amin oksit tespiti için pH indikatör boyaalarının selüloz mikropartikülleri üzerine kovalent olarak immobilize edilmesine dayanan kolorimetrik bir sistem geliştirilmiştir. Bu boyalar gıda bozulmasına yanıt olarak yeşilden kırmızıya doğru renk değişimi göstermektedir. Mikropartiküllerin gıda ile temasa uygun silikon içerisine entegre edilmesi, bu sistemin gıda ambalajlarına güvenli şekilde uygulanabilmesini sağlamaktadır (Schaude vd., 2017). Bu tür akıllı ambalaj sensörleri, gıda ürünlerinde kalite değişimlerinin görsel olarak izlenmesine olanak sağlayarak gıda zinciri boyunca

izlenebilirlik süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Jia ve arkadaşları (2019), aminlere duyarlı selüloz bazlı oranlı floresan materyaller geliştirerek deniz ürünlerinin tazeliğinin gerçek zamanlı ve görsel olarak izlenmesini sağlamıştır. Selüloz zincirlerindeki reaktif hidroksil gruplarından yararlanılarak flüoresan izotiyosiyanat (FITC) ve protoporfirin IX (PpIX) selüloz asetat üzerine bağlanmış ve farklı oranlarda karıştırılarak çift emisyonlu floresan materyaller elde edilmiştir. Bu materyaller, 5.0 ppm ile 2.5×10^4 ppm arasında geniş bir aralıkta amonyağa karşı duyarlı ve doğrusal bir yanıt göstermiştir. Elektro eğirme yöntemiyle elde edilen nanolifli membran, deniz ürünlerinin tazeliğinin görsel olarak izlenmesine olanak sağlayarak gıda bozulmasının erken tespitine ve dolayısıyla gıda güvenliğinin sağlanmasına katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Karbondiyoksit Sensörleri

CO₂, özellikle patojen ve bozulmaya yol açan mikroorganizmaların metabolik aktivitesini baskılayarak raf ömrünü uzatır. Ancak ambalaj içerisindeki CO₂ konsantrasyonundaki azalma, gaz sızması, difüzyon yoluyla kayıp veya ambalaj materyalinde bütünlük bozulması gibi sorunları gösterebilir. Böylece hem ürün güvenliği hem de kalite parametreleri üzerinde olumsuz etki oluşturabilir. Karbondiyoksit algılayıcı sensörler, işlevsel olarak iki ana prensipte çalışır: ilk olarak, CO₂ varlığında pH göstergesinin renk değişimine yol açtığı kolorimetrik sensörler; ikinci olarak ise, CO₂ konsantrasyonuna bağlı olarak lüminesan boyaaların floresans emisyon yoğunluğunu değiştiren optik sensörler. Her iki sistem de ambalaj içi gaz dinamiklerini hassas bir şekilde izleyerek ürün kalitesinin korunmasında kritik rol oynar (Rukchon vd., 2014).

Kolorimetrik sensörlerin analitik hassasiyeti, çoğu gaz algılama teknolojisine oranla genellikle daha düşük olsa da düşük üretim maliyeti, hızlı yanıt süresi ve tahribatsız ölçüm imkânı gibi avantajları, bu sistemleri gıda ambalajlama uygulamalarında uzun vadede stratejik ve umut vadeden bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır. Yapılan bir çalışmada, peynir altı suyu proteini izolatu (WPI) kullanılarak gıda ambalajlarının tepe boşluğunda CO₂ konsantrasyonunun dolaylı izlenmesi hedeflenmiştir. Bu sistemde, taze ürünlerde nötr pH ortamı sensörün şeffaf kalmasını sağlar; ancak mikrobiyal metabolizma ve CO₂ birikimi sonucu ambalaj içi pH 6,0'ın altına düştüğünde sensör opaklaşır. Ambalajda şeffaflıktan opaklığa doğru gerçekleşen görsel değişimin kolayca ayırt edilebilmesi, tüketicinin ürün tazeliğine

ilişkin algısını etkileyerek kalite değerlendirmesini sağlamaktadır (Lee ve Ko, 2014).

Diğer Gazlar

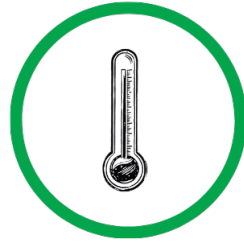
Hidrojen sülfür (H_2S), etanol (C_2H_5OH) ve çeşitli uçucu organik bileşikler, düşük üretim konsantrasyonlarına rağmen mikrobiyal proteoliz ve kimyasal bozunmanın özgül göstergeleri olarak değerlendirilir. Protein bazlı gıdalarda bu bileşiklerin analitik tespiti, mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri ve fermantatif değişimlerinin hassas bir şekilde izlenmesini sağlar. Bu nedenle, söz konusu gazların algılanmasına yönelik sensör teknolojilerinin akıllı ambalaj sistemlerine entegrasyonu, bozulabilir gıdaların kalite ve tazelik takibinde daha seçici ve güvenilir bir izleme yaklaşımı sunmaktadır. Hidrojen sülfür (H_2S), proteinlerin mikroorganizmalar tarafından metabolik olarak parçalanması sırasında üretilen temel uçucu kükürt bileşiklerinden biridir ve bozulmuş et ürünlerinde karakteristik kötü kokunun başlıca kimyasal bileşenini teşkil eder. Renksiz ve uçucu yapısı ile çürük yumurta kokusunu andıran H_2S , özellikle Clostridium ve Shewanella gibi anaerobik bakteriler tarafından sistein ve metiyonin gibi kükürt içeren amino asitlerin parçalanması sonucu ortaya çıkar. Bu bağlamda, H_2S 'nin tespiti, protein açısından zengin gıdalarda mikrobiyal kontaminasyonun ilerlemesini ve bozulma sürecinin ileri aşamalarını değerlendirmede güvenilir bir biyokimyasal parametre olarak kullanılmaktadır. Bu özellikleri doğrultusunda H_2S , protein bazlı gıdalarda mikrobiyal bozunma izleme ve akıllı ambalaj sistemleri için ideal bir hedef gaz olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, nanoyapılı malzemeler, fonksiyonel polimer matrisler ve renk değişimine dayalı kolorimetrik göstergeler kullanılarak, H_2S tespiti için yüksek hassasiyet ve hızlı yanıt süreleri sunan çeşitli sensör teknolojileri geliştirilmiştir (Siciliano vd., 2025).

Teymouri ve Shekarchizadeh (2022), bakır nanoparçacıkları içeren yüksek hassasiyetli bir kolorimetrik indikatör tasarlamış olup, sensör $1,53 \mu g/mL$ tespit limiti ve $4,63 \mu g/mL$ kantifikasyon limiti ile belirgin bir duyarlılık göstermektedir. Sensör, nem, pH ve maruz kalma süresi gibi çevresel değişkenlerden etkilenmeyen kararlı bir tepki profili sunmaktadır. Geliştirilen indikatörün performansı, balık tazeliği göstergeleri olan pH, toplam uçucu bazik azot (TVB-N) ve toplam mikrobiyal yük ile karşılaştırılmış; elde edilen sonuçlar, sensörün renk

değişimi ile ürün tazelik derecesi arasında yüksek korelasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır (Teymouri ve Shekarchizadeh, 2022). Yapılan bir çalışmada ortam koşullarında H_2S tespitine yönelik indiyum oksit nanoparçacıkları (In_2O_3NPs) içeren nanokompozit tabanlı yenilikçi bir sensör geliştirilmiştir. Geliştirilen sensör, çok düşük H_2S konsantrasyonlarını (<100 ppb) tespit edebilme yeteneği ile dikkat çekici bir performans göstermiştir. Sensörün yüksek nem koşullarında dahi stabil çalışabilmesi, zorlu çevresel koşullarda kimyasal stabilitesini koruması ve geniş sıcaklık aralığında işlevini sürdürebilmesi, bu teknolojinin gıda ürünlerinde bozulma göstergelerinin izlenmesi açısından uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür sensör tabanlı akıllı ambalaj sistemleri, gıda güvenliği ve izlenebilirlik uygulamalarının geliştirilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir (Al Shboul vd., 2023).

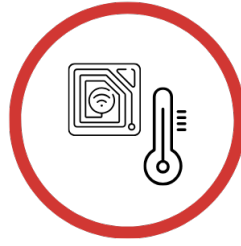
Etanol, özellikle fermente ürünlerde ve karbonhidrat ile şeker bakımından zengin gıdaların bozulma süreçlerinde ortaya çıkan önemli uçucu bileşiklerden biri olup gıda bozulmasının izlenmesinde temel göstergelerden biri olarak kabul edilmektedir. Mikrobiyal aktivite ve fermantasyon süreçleri ile birlikte etanol üretimi önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle etanolün doğru ve zamanında tespit edilmesi, gıda ürünlerinde kalite kayıplarının belirlenmesi ve gıda güvenliği risklerinin erken aşamada tespit edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Siciliano vd., 2025). Bu bağlamda Kaewnu ve arkadaşları, korunmuş bebek mangolarda mikrobiyal fermantasyon sonucu oluşan etanolün tespit edilmesi amacıyla akıllı ambalaj uygulamaları için kolorimetrik bir gösterge küpü geliştirmiştir. Kolorimetrik gösterge küpünün etanol buharına verdiği kromatik yanıt %0 ile %10 arasındaki konsantrasyon aralığında incelenmiştir. Buharların geçirgen bir membran aracılığıyla difüze olarak MF küpü içerisindeki indikatör çözeltisi ile etkileşime girmesi sonucunda sarıdan kahverengiye, yeşile ve maviye doğru bir renk değişimi meydana gelmiştir. Bu tür kolorimetrik sensör sistemleri, gıdalarda meydana gelen fermantasyon ve bozulma süreçlerinin görsel olarak izlenmesini sağlayarak gıda tedarik zinciri boyunca izlenebilirlik uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilecek bir yaklaşım sunmaktadır (Kaewnuvd., 2022).

Çizelge 5. Gıda tedarik zincirinde izleme amacıyla mevcut RFID teknolojileri
Table 5. Currently available RFID technologies for monitoring in the food supply chain



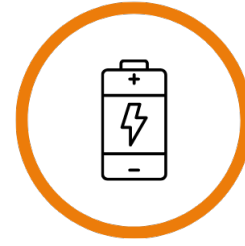
TEMP TRIP

Bu sıcaklık etiketi, ultra yüksek frekans (UHF) kullanarak okuyucularla kablosuz iletişim kurar ve elde edilen veriler doğrudan bir internet sayfasına aktarılır. Soğuk zincir uygulamalarında kullanılır (Tebaldi vd., 2023).



EASY2LOG

Düşük maliyetli, yarı-pasif etiket; sıcaklığa duyarlı ürünlerin depolama ve taşıma süreçleri boyunca izlenmesine olanak tanır. Kullanıcının yapılandırabildiği kalan raf ömrü süresi ve ortalama kinetik sıcaklık hesaplamalarına ek olarak, belirlenen eşik değerlerinin aşılması durumunda alarm verebilir. Dondurulmuş gıda, süt ürünleri, et ve kümes hayvanı ürünleri, deniz ürünleri uygulamalarında kullanılır (Ahmed vd., 2018).



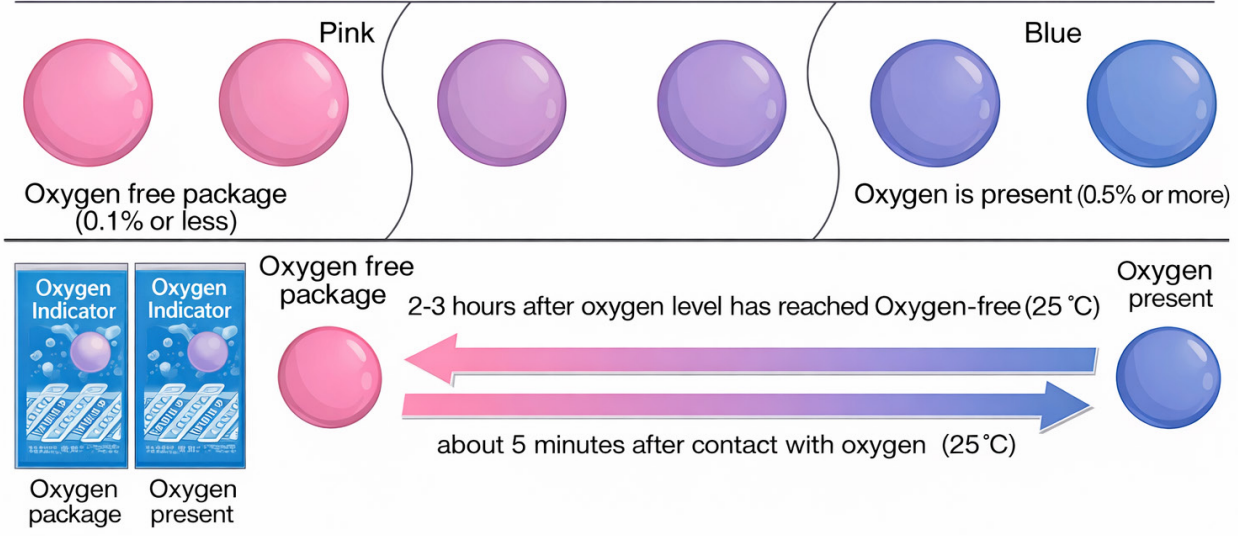
CS8304

Etiket üzerinde sıcaklık verilerini depolamak için 10.000 örnek kapasiteli bir kayıt hafızası bulunur. Sıcaklık ihlalleri LED ışığı aracılığıyla gösterilir. Soğuk zincir uygulamalarında kullanılır (Drago vd., 2020).

Gıda sektöründe RFID teknolojisi, tedarik zinciri boyunca gerçek zamanlı izlenebilirlik, ürün izlenebilirliğinin iyileştirilmesi ve geri çağırma operasyonlarının doğruluk ve hızının artırılması gibi etkilerde bulunması sebebiyle gıda güvenliğine doğrudan katkı sağlayan ileri bir teknolojidir (Esteghlal vd., 2018). Sistemin uygulandığı lojistik ortamlarda her palet, ürün parti bilgisi, üretim tarihi, depolama koşulları ve sevkiyat ayrıntılarını içeren RFID etiketleri ile donatılmaktadır. Depo giriş-çıkış hatlarına entegre edilen yüksek frekanslı antenler, bu etiketlerden yayılan elektromanyetik sinyalleri algılayarak ilgili verileri anlık olarak bilgi sistemine iletmektedir. Böylece stok kontrol süreçlerinde doğruluk artmakta, yerleşim hataları minimize edilmekte ve sevkiyat planlaması daha etkin biçimde yapılabilmektedir. Bu teknolojinin operasyonel verimlilik ve maliyet azaltma

açısından önemli avantajlar sağlamasına karşın, gıda sektöründe büyük ölçekli yaygınlık düzeyi hâlâ sınırlıdır (Han, 2007). RFID etiketinin çalışma prensibine ilişkin şematik gösterim Şekil 5'te sunulmuştur.

RFID teknolojisinin yaygın olarak benimsenmesi ve gıda bilimi ile entegrasyonu, gıda güvenliği ve kaliteyi önceliklendiren akıllı gıda ambalaj sistemlerinin geliştirilmesi için temel gereklilikler arasında yer almaktadır. İzlenebilirlik, ürün bütünlüğünü gösteren sistemler ve sürdürülebilirlik modern gıda ambalajının temel bileşenleri haline gelmiş olup bu sistemler akıllı ambalaj olarak adlandırılmaktadır (Sohail vd., 2018). Bu bağlamda, söz konusu teknolojilerin gıda güvenliği ve izlenebilirlik süreçlerine olan katkılarının birlikte değerlendirilmesi literatürde önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır (Rajan ve Wani., 2025).



Şekil 5. Oksijen İndikatörü (Ageless-Eye®) (Otlas, S., Yalçın, B., 2008)

Figure 5. Oxygen indicator (Ageless-Eye®) (Otlas, S., & Yalçın, B., 2008)

Akıllı Etiketler

Akıllı etiket sistemleri, gıda ürünlerinin tazelik ve kalite durumunu; ambalaj içi gaz kompozisyonundaki değişimler, uçucu bileşiklerin birikimi, pH varyasyonları veya ambalaj atmosferinin oluşturduğu elektriksel/optik sinyaller üzerinden değerlendiren sensör tabanlı yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler tarafından sağlanan görsel çıktılar tüketicilerin ürünün mevcut kalite ve güvenilirlik düzeyi hakkında gerçek zamanlı bilgi edinmesini mümkün kılarak güvenli tüketimi teşvik etmekte ve daha bilinçli satın alma kararlarını desteklemektedir (Özçandır ve Yetim, 2010).

Akıllı etiket teknolojilerinin uygulanabilirliğini artırmak amacıyla, sistemin doğruluk, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik açısından yüksek performans sergilemesi; aynı zamanda ekonomik olarak sürdürülebilir, uygulaması kolay ve üretim aşamasında hızlı bir şekilde aktive edilebilir olması gerekmektedir. Ek olarak, kullanılan indikatör materyallerinin oda sıcaklığında fiziko-kimyasal stabilitesini muhafaza edebilmesi, gıda ile dolaylı temas açısından güvenilir bulunması ve konvansiyonel baskı teknolojileriyle uyumlu olarak ambalaj yüzeylerine entegre edilebilir özellikte tasarlanması büyük önem taşımaktadır (Han vd., 2005; Otlas ve Yalçın, 2008).

Akıllı etiketlerin gıda ambalajlarında yaygınlaşması, ürün

tazeliğinin izlenmesini sağlayarak tüketicilerin bilinçli tercihlerde bulunmasına yardımcı olabilir ve buna bağlı olarak yenilebilir durumdaki gıdaların gereksiz bertarafını azaltarak israfın önlenmesine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Ayrıca, bozulma veya güvenli olmayan depolama koşullarına bağlı değişiklikleri saptayabilme yeteneği sayesinde, bu teknolojiler potansiyel gıda güvenliği risklerinin önlenmesinde kritik bir rol oynayabilir.

Tüketicilerin ürün bileşenleri, kullanım yönergeleri ve depolama koşullarına ilişkin daha yüksek doğrulukta ve kapsamda bilgi talep etmesi, akıllı ambalajlama teknolojilerinin gıda sektöründeki önemini giderek artırmaktadır. Akıllı etiketler, ambalajdaki renk veya görsel değişimler aracılığıyla tüketicilere bilgi vererek etkileşim sağlar (Schilthuisen, 1999; Ananim, 2010c). Gıda üretim sisteminin teknolojik entegrasyonu Çizelge 6'da gösterilmiştir. Shangguan ve arkadaşları (2019), açık ve kolay yorumlanabilir etiketleme uygulamalarının hem ürün reformülasyonunu teşvik ettiğini hem de tüketicilerin gıda ürünlerine ilişkin bilgileri daha iyi kavramasına katkı sağladığını belirtmiştir.

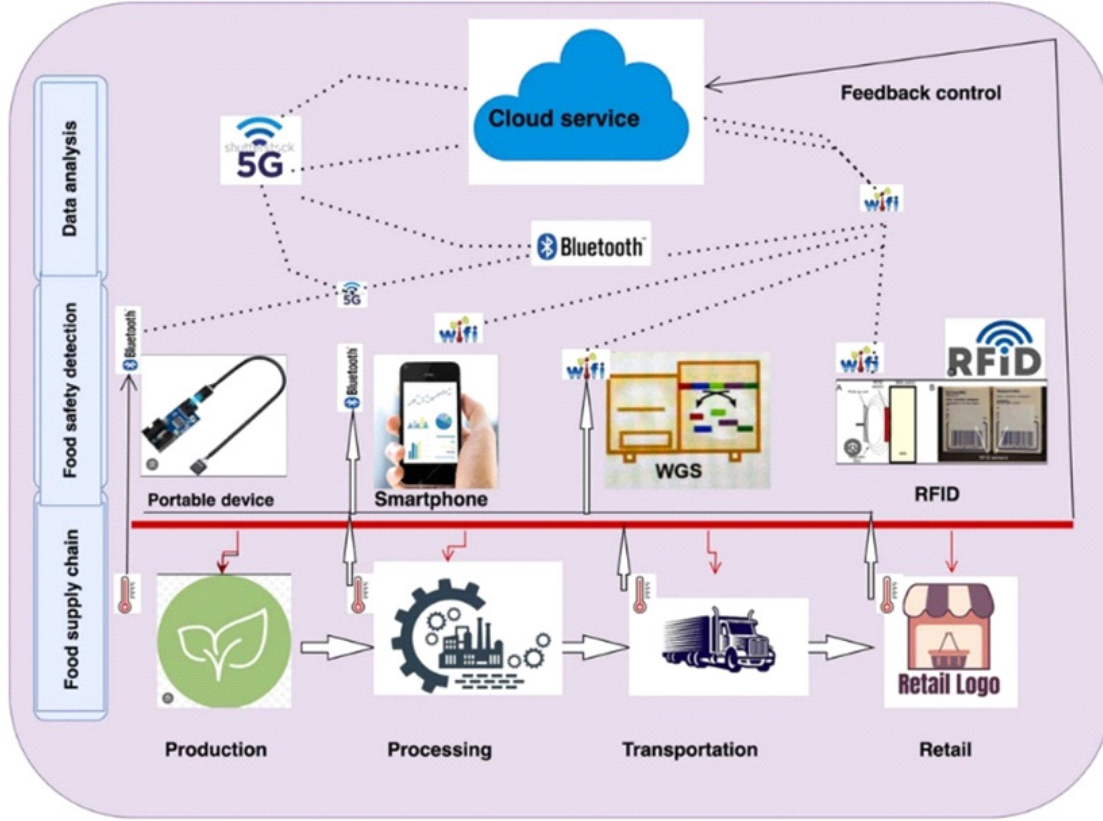
Bu sistem, akıllı telefon uygulaması ile birlikte çalışan IoT tabanlı bir sensör kartı bileşeni olarak tasarlanmıştır. Sensör kartında yer alan tartım sensörü, mikroişlemci ve kablosuz iletişim modülü tarafından yönetilerek ölçülen ağırlık verilerini bulut ortamına aktarır (Kane-Potaka vd., 2021). Akıllı telefon

uygulaması, cihaz kamerasını kullanarak gıda öğesinin besin içeriklerini tanımlayabilmekte; ardından sistem tüketilen toplam

besin miktarını analiz ederek kullanıcıya hesaplanan besin değerlerini sunmaktadır (Yu vd., 2020).

Çizelge 6. Gıda üretim sisteminin teknolojik entegrasyonu (Yu, Z vd., 2020).

Table 6. Technological integration of the food production system (Yu, Z. et al., 2020)



Gelecekteki Trendler

Akıllı gıdaların gelişimini destekleyen teknolojik ilerlemeler; beslenmenin iyileştirilmesi, kullanım kolaylığının artırılması ve sürdürülebilirliğin güçlendirilmesi yönünde çok çeşitli yenilikçi yaklaşımlar sunulmaktadır (Tripathi vd., 2024). IoT entegrasyonlu cihazlar, yapay zekâ temelli beslenme planlama araçları ve blok zinciriyle güçlendirilmiş tedarik zinciri sistemleri, kişiselleştirilmiş beslenmenin değerini vurgulamakta ve gıda güvenliği ile yetersiz beslenme gibi global sorunlara çözüm perspektifi sağlamaktadır (Liu vd., 2022b).

Akıllı nesnelere ağı (IoT), birbirine bağlı ve benzersiz kimliklere sahip bilgi işlem cihazlarının insan müdahalesi olmadan veri aktarımı gerçekleştirebildiği ağ temelli bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Yaqoob ve Younis, 2021). Bu teknoloji, fiziksel ve dijital sistemlerin etkileşimini sağlamak için internet tabanlı iletişime yararlanır. Gıda alanında kullanılan bulut

tabanlı arama veritabanları; barkod, yakın kızılötesi (Near-Infrared, NIR) spektrumları ve görüntü analizine dayalı yöntemlerle ürünlerin otomatik tanımlanmasına olanak tanır (Nagajayanthi, 2022). Yapılan çalışmalar, IoT tabanlı sistemlerin gıda takibi ve kalori hesaplamalarında doğruluğu artırdığını ve pilot uygulamalarda gıda israfını %30 oranına kadar azalttığını göstermektedir. Bu kapsamda, IoT destekli akıllı buzdolapları son kullanma tarihi takibi ve tarif önerileri sunarak kullanıcı deneyimini iyileştirirken sürdürülebilir tüketim davranışlarını da teşvik etmektedir (Nath vd., 2024).

Geleneksel izlenebilirlik sistemlerinin hem doğruluk hem de güvenilirlik açısından yetersiz kalması, gıda tedarik zincirinde blok zinciri teknolojisini yenilikçi ve dönüştürücü bir çözüm olarak öne çıkarmaktadır (Ali vd., 2023). Blok zinciri, değişmezlik ve şeffaflık özellikleri sayesinde ürünlerin tedarik zincirinde güvenli ve kesintisiz biçimde izlenmesini mümkün kılar. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi, gıda endüstrisinde

kalite kontrol, güvenlik değerlendirmesi, izlenebilirlik ve süreç optimizasyonu gibi kritik alanlarda giderek artan bir etki alanına sahiptir. Bu teknolojiler, büyük veri setlerinin analiz edilmesi, karmaşık ilişkilerin modellenmesi ve gerçek zamanlı karar mekanizmalarının geliştirilmesi yoluyla insan yeteneklerinin ötesinde doğruluk, hız ve hassasiyet sağlamaktadır (Xu vd., 2024).

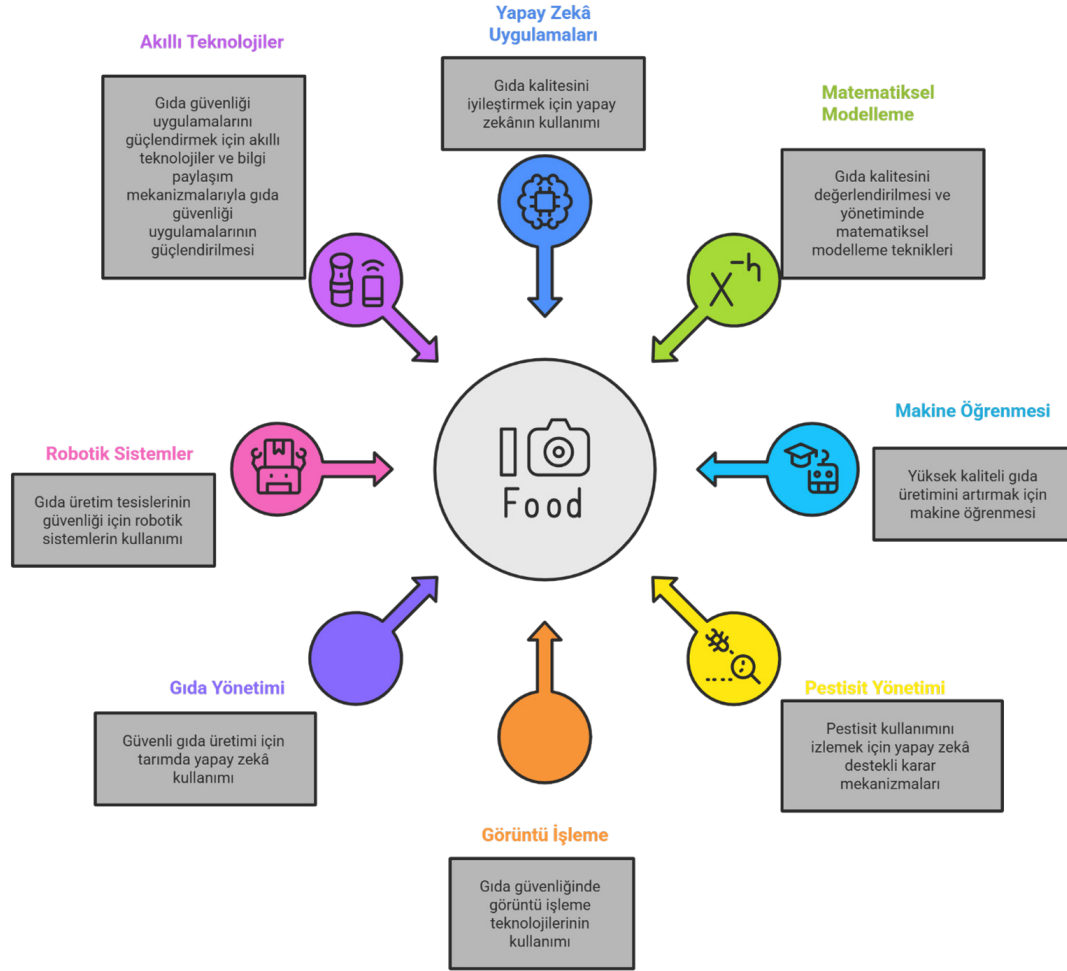
Yapay zeka, gıda güvenliği açısından kritik olan biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlikelerin erken tespitinde de önemli bir rol üstlenmektedir. Mikrobiyal büyüme modelleri, patojenlerin çevresel koşullara verdiği tepkileri öngörebilmekte; bu da tehlike analizi ve kritik kontrol noktaları (HACCP) sistemlerinin

daha dinamik ve veri temelli yönetilmesine imkân tanımaktadır. Aynı zamanda yapay zeka destekli modeller, soğuk zincir kırılmalarını tespit edebilir, raf ömrü boyunca ürün güvenliğini etkileyebilecek sıcaklık-süre değişimlerini analiz edebilir ve bu değişikliklerin kalite kaybı veya patojen gelişimi üzerindeki olası etkilerini hesaplayabilir (Kumar vd., 2023).

Önümüzdeki dönemde, sensör teknolojilerinin gelişmesi, büyük veri altyapılarının güçlenmesi ve hesaplama kapasitesinin artmasıyla birlikte bu teknolojilerin gıda sektöründeki uygulama alanlarının daha da genişlemesi beklenmektedir. Gıda endüstrisinde yapay zeka ve makine öğrenmenin kullanım alanları Çizelge 7'de yer almaktadır.

Çizelge 7. Gıda endüstrisinde yapay zeka ve makine öğrenmenin rolü

Table 7. The role of artificial intelligence and machine learning in the food industry



SONUÇ

Aktif ve akıllı ambalajlama teknolojileri, modern gıda endüstrisinin kalite, güvenlik, izlenebilirlik ve sürdürülebilirlik gereksinimlerine yanıt veren en ileri düzey yenilikçi çözümler arasında yer almaktadır. Gıdanın raf ömrü boyunca meydana gelen biyokimyasal, mikrobiyolojik ve fiziksel değişimlerin yüksek hassasiyetle izlenebilmesine olanak sağlayan bu sistemler, hem tedarik zincirinde kontrol mekanizmalarının güçlendirilmesi hem de tüketici güveninin artırılması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, zaman-sıcaklık indikatörleri, tazelik indikatörleri, gaz konsantrasyon sensörleri, patojen indikatörleri, radyo frekanslı tanıma sistemleri (RFID), biyosensörler ve diğer gaz sensörleri (ör. CO₂, amonyak ve uçucu amin sensörleri) gibi çok çeşitli akıllı bileşenler, ambalajların yalnızca pasif bir koruyucu yapı olmaktan çıkıp, gerçek zamanlı bilgi sağlayan fonksiyonel platformlara dönüşmesini mümkün kılmıştır. Zaman-sıcaklık indikatörleri (TTI), ürünün maruz kaldığı ısıl geçmişi kimyasal, enzimatik veya polimerik reaksiyonlar üzerinden izleyerek soğuk zincirdeki kopuklukların belirlenmesini kolaylaştırmakta ve bozulma kinetiğiyle ilişkili kritik sınırların aşılmasını görünür kılmaktadır. Benzer şekilde tazelik indikatörleri, gıdanın bozulma sürecinde ortaya çıkan pH değişimleri, uçucu amin oluşumu, organik asit üretimi ya da oksidatif reaksiyon ürünlerini doğrudan takip ederek tüketilebilirlik düzeyi hakkında anlık bilgi sağlamaktadır. Gaz konsantrasyon indikatörleri ve karbondioksit sensörleri ise, özellikle modifiye atmosfer ambalajlarında (MAP) gaz kompozisyonunun zamanla değişimini yüksek doğrulukla izleyerek oksijen girişini, CO₂ birikimini veya anaerobik bozulmayı tespit etmeye olanak tanımaktadır. Amonyak ve uçucu amin sensörleri, başta balık ve et gibi proteince zengin gıdalarda mikrobiyal bozulmanın karakteristik ürünlerini renk değişimi, floresans veya elektro-kimyasal sinyal yoluyla saptayarak raf ömrü yönetimini optimize etmektedir.

Akıllı etiketler ve RFID tabanlı tanıma sistemleri, hem tedarik zinciri boyunca izlenebilirlik hem de tüketici düzeyinde şeffaflık sağlaması bakımından büyük önem taşımaktadır. RFID teknolojisi, temas gerektirmeyen veri aktarımı sayesinde ürünlerin lojistik akışını dijital olarak takip etmeye imkân tanırken; kimyasal, biyokimyasal veya fiziksel indikatörlerle entegre edilen akıllı etiketler, tazelik ve bozulma durumunu doğrudan tüketiciye ileten bir karar destek aracı görevi

üstlenmektedir. Tüm bu teknolojilerin entegrasyonu, sürdürülebilir gıda sistemleri açısından da kritik öneme sahiptir. Akıllı ambalajın sağladığı yüksek doğruluklu izleme kapasitesi, gıda israfının azaltılmasını, enerji tüketiminin optimize edilmesini ve tedarik zincirinin daha verimli yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte akıllı ve aktif ambalajlama çözümlerinin geniş ölçekli uygulaması için, maliyet etkinliği, mevzuat uyumluluğu, toksikolojik güvenlik, malzeme stabilitesi, baskı süreçlerine entegrasyon ve tüketici kabulü gibi kritik bileşenlerin titizlikle değerlendirilmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, bu sistemlerin maliyet etkin, ölçeklenebilir, toksikolojik açıdan güvenli ve tüketici tarafından kolay anlaşılabilir hâle getirilmesine odaklanması, aktif ve akıllı ambalaj teknolojilerinin gıda sektöründe standart bir uygulama hâline gelmesini hızlandıracaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar) herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

FİNANSAL DESTEK

Yazar(lar) herhangi bir finansal destek olmadığını beyan eder.

YAZAR KATKILARI

Tansu YILDIRIM AYAYDIN, Tuğba DURSUN ÇAPAR: Araştırma, yazım – orijinal taslak, inceleme ve düzenleme, görselleştirme; Metodoloji, doğrulama, araştırma

KAYNAKLAR

Abedi-Firoozjah, R., Ahmadi, N., Valaee, S., Zamanpour, S., Moradian, M. H., Bahramian, B., & Sadeghi, E. (2025). Unlocking the potential of cyclodextrin/metal-organic frameworks in food packaging systems: an exclusive review on the latest trends. *Food and Bioprocess Technology*, 18(6), 5010-5037.

Aday, M.S., Caner, C., Rahvalı, F. (2011). Effect of oxygen and carbon dioxide absorbers on strawberry quality. *Postharvest Biology and Technology*, 62(2), 179-187.

Ahmed, I., Lin, H., Zou, L., Brody, A.L., Li, Z., & Lv, L. (2017). A comprehensive review on the application of active packaging technologies to muscle foods. *Food Control*, 82, 163-178.

- Ahmed, I., Lin, H., Zou, L., Li, Z., Brody, A. L., & Sun, L. (2018). An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products. *Packaging Technology and Science*, 31(7), 449-471.
- Ahvenainen, R. (Ed.). (2003). *Novel food packaging techniques*. Elsevier.
- Al Shboul, AM, Ketabi, M., Mechael, SS, Nyayachavadi, A., Rondeau-Gagné, S., & Izquierdo, R. (2023). IoT Gıda Ambalaj Uygulamaları için Baskılı, Esnek, Tek Kullanımlık In2O3 NPs Tabanlı Sensör ile Oda Sıcaklığında ppb Seviyelerinde Hidrojen Sülfür Gazı Tespiti. *Gelişmiş Malzeme Teknolojileri*, 8 (2), 2201086.
- Alam, A. U., Rathi, P., Beshai, H., Sarabha, G. K., Deen, M. J. (2021). Fruit quality monitoring with smart packaging. *Sensors*, 21(4), 1509.
- Ali, I., Arslan, A., Tarba, S., Mainela, T. (2023). Supply chain resilience to climate change inflicted extreme events in agri-food industry: The role of social capital and network complexity. *International Journal of Production Economics*, 264, 108968.
- Álvarez-Hernández, M. H., Martínez-Hernández, G. B., Avalos-Belmontes, F., Castillo-Campohermoso, M. A., Contreras-Esquivel, J. C., Artés-Hernández, F. (2019). Potassium permanganate-based ethylene scavengers for fresh horticultural produce as an active packaging. *Food Engineering Reviews*, 11(3), 159-183.
- Alves-Silva, J. M, dos Santos, S.M.D., Pintado, M.E., Pe´rez-A´lvarez, J.A., Fern´andez-L´opez, J., ViudaMartos, M. (2013). Chemical composition and in vitro antimicrobial, antifungal and antioxidant properties of essential oils obtained from some herbs widely used in Portugal. *Food Control*, 32(2), 371-78.
- Anonim, 2007, <http://www.freshcheck.com/reading.asp>
- Anonim, 2010, OnVu® Ice, Product Details, <http://www.freshpoint-tti.com/productSpec.asp?id=16&name=OnVu%20Ice>.
- Anonim, 2010, RipeSense, How It Works, http://www.ripesense.com/ripesense_howitworks.html
- Anonim, 2010, Akıllı Etiketler, <http://www.sedef.com/akillietiket.html>.
- Appendini, P. and Hotchkiss, J.H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science*, 3, 113- 126.
- Ashiq, J., Saeed, U., Li, Z., Nawaz, M. H. (2024). Advances in meat spoilage detection: A review of methods involving 2D-based nanomaterials for detection of spoiled meat. *Journal of Food Composition and Analysis*, 132, 106295.
- Bovi, G.G., Caleb, O.J., Klaus, E., Tintchev, F., Rauh, C., & Mahajan, P.V. (2018). Moisture absorption kinetics of FruitPad for packaging of fresh strawberry. *Journal of Food Engineering*, 223, 248-254.
- Cai, Z., Zhang, H. (2021). The effect of carboxymethylation on the macromolecular conformation of the (1→3)-β-D-glucan of curdlan in water. *Carbohydrate Polymers*, 272, 118456.
- Caldeira, C., Vlysidis, A., Fiore, G., De Laurentiis, V., Vignali, G., & Sala, S. (2020). Gıda atıklarının biyorafinasyonunun sürdürülebilirliği: Değerlendirme yolları, teknik-ekonomik kısıtlamalar ve çevresel değerlendirme üzerine bir inceleme. *Bioresource Technology*, 312, 123575.
- Chen, S., Brahma, S., Mackay, J., Cao, C., Aliakbarian, B. (2020). The role of smart packaging system in food supply chain. *Journal of food science*, 85(3), 517-525.
- Chi-Zhang, Y., Yam, K. L., Chikindas, M. L. (2004). Effective control of *Listeria monocytogenes* by combination of nisin formulated and slowly released into a broth system. *International Journal of Food Microbiology*, 90(1), 15-22.
- Coles, R., Kirwan, M. J. (2011). *Food and beverage packaging technology*. John Wiley & Sons.
- Coma, V. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat Science*, 78, 90-103.
- Cooksey, K. (2001). Antimicrobial food packaging materials. *Additives for Polymer*, 8, 6-10.
- Costa, L. A. D., Diógenes, I. C. N., Oliveira, M. D. A., Ribeiro, S. F., Furtado, R. F., B, M. D. S. R., & Benevides, S. D. (2020). Smart film of jackfruit seed starch as a potential indicator of fish freshness. *Food Science and Technology*, 41, 489-496.

- Danchuk, A. I., Komova, N. S., Mobarez, S. N., Doronin, S. Y., Burmistrova, N. A., Markin, A. V., & Duerkop, A. (2020). Optical sensors for determination of biogenic amines in food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412(17), 4023–4036.
- Dash, L., Mahanwar, P. A. (2021). A review on organic phase change materials and their applications. *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol*, 5(9), 268-284.
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11), 1628.
- Erfani, A., Pirouzifard, M. K., Pirsá, S. (2023). Photochromic biodegradable film based on polyvinyl alcohol modified with silver chloride nanoparticles and spirulina; investigation of physicochemical, antimicrobial and optical properties. *Food Chemistry*, 411, 135459.
- Escobar-Vera, C., Soriano-Amat, M., Martins, H. F., Barrera, D., Martín-Lopez, S., Gonzalez-Herraez, M., & Fernández-Ruiz, M. R. (2023). Dynamic curvature sensing using time expanded Φ OTDR. *Optics letters*, 48(16), 4336-4339.
- Esteghlal, S., Niakousari, M., Hosseini, SMH (2018). Elektrostatik etkileşimlerin etkisi altında jelatin-CMC kompozit filmlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri. *Uluslararası Biyolojik Makromoleküller Dergisi*, 114 , 1-9.
- Fang, Z., Zhao, Y., Warner, R. D., Johnson, S. K. (2017). Active and intelligent packaging in meat industry. *Trends in Food Science & Technology*, 61: 60- 71, doi: 2017.01.002.
- Feng, X., Fu, C., Yang, H. (2017). Gelatin addition improves the nutrient retention, texture and mass transfer of fish balls without altering their nanostructure during boiling. *LWT- Food Science and Technology*, 77, 142-151.
- Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International*, 141, 110113.
- Fu, Y., Dudley, E. G. (2021). Antimicrobial□ coated films as food packaging: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3404-3437.
- Garg, A., Joshi, K. ve Raghav, P. K. (2022). Smart food for better health and nutrition—a promising concept. *Journal of Postharvest Technology*, 10(4), 179-190.
- Gök, V., (2007), Gıda Paketleme Sanayinde Akıllı Paketleme Teknolojisi, *Gıda Teknolojileri Dergisi*, 1: 45-58.
- Han, J.H. (2000). Antimicrobial Food Packaging. *Food Technology*, 54(3), 56-65.
- Han, J.H., (2007), *Packaging for Nonthermal Processing of Food*, Blackwell, USA, pp. 131-137.
- Han, Y.H., Ho, C.H.L., Rodrigues, E.T., (2005), Intelligent Packaging, In: *Innovations in Food Packaging*, Edited by Han, J.H., Elsevier Academic Press, London, pp. 138-153.
- Hashemian, H., Ghaedi, M., Dashtian, K., Mosleh, S., Hajati, S., Razmjoue, D., & Khan, S. (2023). Et ürünlerinin bozulmasının tahribatsız uzaktan izlenmesi için selüloz asetat/MOF film tabanlı kolorimetrik amonyak sensörü. *International Journal of Biological Macromolecules*, 249 , 126065.
- Hempel, A. W. (2014). Use of oxygen sensors for the non destructive measurement of oxygen in packaged food and beverage products and its impact on product quality and shelf life.
- Hepsağ, F., Varol, T. (2018). Intelligent packaging use in food industry and traceability. *Adyütayam*, 6(1), 29-39.
- Huang, Y., Fu, S. (2023). Çiftçilerin izlenebilirlik sistemlerine katılma istekliliğinin modellenmesi: sürdürülebilir tarımsal dönüşüme doğru. *Sürdürülebilir Gıda Sistemlerinde Sınırlar*, 7, 1254797.
- Jankowski-Mihulowicz, P., Węglarski, M., Pyt, P., Skrobacz, K., Karpiński, K. (2023). UHF Textronic RFID Transponder with Bead-Shaped Microelectronic Module. *Electronics*, 12(23), 4873.
- Jia, R., Tian, W., Bai, H., Zhang, J., Wang, S., & Zhang, J. (2019). Karides ve yengeç tazeliğinin gerçek zamanlı ve görsel tespiti için amin duyarlı selüloz bazlı ratiometrik floresan malzemeler. *Nature Communications*, 10 (1), 795.
- Jiao, X., Yang, M., Chong, X., Liu, G., Du, H., Liu, X., & Wen, Y. (2024). Humidity and pH dual-responsive smart nanofiber

- antimicrobial packaging. *Journal of Food Engineering*, 380, 112163.
- Kaewklin, P., Siripatrawan, U., Suwanagul, A., & Lee, Y.S. (2018). Active packaging from chitosan-titanium dioxide nanocomposite film for prolonging storage life of tomato fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, 112, 523-529.
- Kaewnu, K., Samoson, K., Thiangchanya, A., Phonchai, A., & Limbut, W. (2022). A novel colorimetric indicator for ethanol detection in preserved baby mangoes. *Food chemistry*, 369, 130769.
- Kane-Potaka, J., Poole, N., Diama, A., Kumar, P., Anitha, S., Akinbamijo, O. (2021). The smart food approach: the importance of the triple bottom line and diversifying staples. In *Orphan Crops for Sustainable Food and Nutrition Security* (pp. 327-334). Routledge.
- Kerry, J.P., Hogan, S.A., O'Grady M.N., (2006), Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: a review, *Meat Sci.*, 74: 113-130.
- Khezerlou, A., Tavassoli, M., Alizadeh Sani, M., Ehsani, A., McClements, D. J. (2023). Smart packaging for food spoilage assessment based on Hibiscus sabdariffa L. anthocyanin-loaded chitosan films. *Journal of Composites Science*, 7(10), 404.
- Koshy, J. T., Vasudevan, D., Sangeetha, D., Prabu, A. A. (2023). Biopolymer based multifunctional films loaded with anthocyanin rich floral extract and ZnO nano particles for smart packaging and wound healing applications. *Polymers*, 15(10), 2372.
- Kumar, A., Singhal, S., Kumar, V., Choudhary, V. (2023). Besin Takviyesi Olarak Nutrasötiklerin Sağlık Sistemindeki Rolü: Kapsamlı Bir İnceleme. *Eczacılıkta Sistematik İncelemeler*, 14 (10).
- Kumar, V., Sharma, A. K., Dwivedi, S. V. (2024). Shree Anna: The Nutritional Powerhouse Paving the Path for Health Security in India. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(6), 230-240.
- Lee, D. S., Robertson, G. L. (2021). Interactive influence of decision criteria, packaging film, storage temperature and humidity on shelf life of packaged dried vegetables. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100674.
- Lee, K., Ko, S. (2014). Proof-of-concept study of a whey protein isolate based carbon dioxide indicator to measure the shelf-life of packaged foods. *Food science and biotechnology*, 23(1), 115-120.
- Li, W., Li, L., Cao, Y., Lan, T., Chen, H., & Qin, Y. (2017). Effects of PLA film incorporated with ZnO nanoparticle on the quality attributes of fresh-cut apple. *Nanomaterials*, 7(8), 207.
- Li, Y., Wu, K., Wang, B., Li, X. (2021). Akıllı ambalajlamada uygulama için mor domates antosiyaninleri ve kitosan bazlı kolorimetrik gösterge. *Uluslararası Biyolojik Makromoleküller Dergisi*, 174, 370-376.
- Liu, J., Wu, D., Wu, Y., Shi, Y., Liu, W., Sun, Z., & Li, G. (2024). Recent advances in optical sensors and probes for the detection of freshness in food samples: A comprehensive review (2020–2023). *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 177, 117793.
- Liu, S., Hua, G., Kang, Y., Cheng, T. E., Xu, Y. (2022a). What value does blockchain bring to the imported fresh food supply chain?. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 165, 102859.
- Liu, X., Le Bourvellec, C., Yu, J., Zhao, L., Wang, K., & Hu, Z. (2022b). Trends and challenges on fruit and vegetable processing: Insights into sustainable, traceable, precise, healthy, intelligent, personalized and local innovative food products. *Trends in Food Science & Technology*, 125, 12-25.
- Luzardo, S., Saadoun, A., Cabrera, M. C., Terevinto, A., Brugnini, G., & Rufo, C. (2024). Effect of beef long-storage under different temperatures and vacuum-packaging conditions on meat quality, oxidation processes and microbial growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(2), 1143-1153.
- Ly, C., Zhou, X., Chen, C., Liu, X., Qian, J. (2024). Highly sensitive and flexible ammonia sensor based on PEDOT: PSS doped with Lewis acid for wireless food monitoring. *Chemical Engineering Journal*, 493, 152652.
- Meliana, C., Liu, J., Show, PL, Low, SS (2024). Gıda güvenliği ve emniyeti için akıllı gıda izlenebilirlik sisteminde biyosensör. *Biyomüendislik*, 15 (1), 2310908.
- Min, T., Zhou, L., Sun, X., Du, H., Zhu, Z., Wen, Y. (2022).

- Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: A review. *Food Chemistry*, 391, 133239.
- Mohammadinejad, S., Almasi, H., Moradi, M. (2020). Immobilization of Echium amoenum anthocyanins into bacterial cellulose film: A novel colorimetric pH indicator for freshness/spoilage monitoring of shrimp. *Food Control*, 113, 107169.
- Mohammadian, E., Alizadeh-Sani, M., Jafari, S. M. (2020). Smart monitoring of gas/temperature changes within food packaging based on natural colorants. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2885-2931.
- Nagajayanthi, B. (2022). Decades of internet of things towards twenty-first century: A research-based introspective. *Wireless Personal Communications*, 123(4), 3661-3697.
- Nascimento, S. S., Delfino, A. V., Abreu, F. C., Santos, D. M. (2021). Prospecção tecnológica sobre embalagens ativas para alimentos. *Cadernos de prospecção*, 14(4), 1310-1325.
- Nath, P. C., Bhunia, B., Bandyopadhyay, T. K., Roy, B. (2023). Smart packaging to preserve fruit quality. In *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 267-281). Elsevier.
- Nath, P. C., Sharma, R., Mahapatra, U., Mohanta, Y. K., Rustagi, S., & Sridhar, K. (2024). Sustainable production of cellulosic biopolymers for enhanced smart food packaging: An up-to-date review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273, 133090.
- Neethirajan, S., Ragavan, V., Weng, X., Chand, R. (2018). Sürdürülebilir gıda mühendisliği için biyosensörler: zorluklar ve perspektifler. *Biyosensörler*, 8 (1), 23.
- Nugraha, B., Bintoro, N., Murayama, H. (2015). Influence of CO₂ and C₂H₄ Adsorbents to the Symptoms of Internal Browning on the Packaged 'Silver Bell' Pear (*Pyrus communis* L.). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 127-131.
- Öksüztepe G., Beyazgül P., (2015). Akıllı Ambalajlama Sistemleri ve Gıda Güvenliği F.Ü. Sađ. Bil. Vet. Derg. 29 (1): 67 – 74.
- Otles, S., Yalçın, B., (2008), Intelligent Food Packaging, *LogForum*, 4: 3, İzmir.
- Özçandır, S., Yetim, H. (2010). Akıllı ambalajlama teknolojisi ve gıdalarda izlenebilirlik. *Electronic Journal of Food Technologies*, 5(1), 1-11.
- Pang, H., Wu, Y., Tao, Q., Xiao, Y., & Wang, H. (2024). Active cellulose acetate/purple sweet potato anthocyanins@ cyclodextrin metal-organic framework/eugenol colorimetric film for pork preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263, 130523.
- Pereira De Abreu, D.A., Cruz, J.M., Losada, P.P., (2012). Active and Intelligent Packaging for The Food Industry. *Food Reviews International*, 28: 146–187.
- Pereira, T., Barroso, S., Gil, M. M. (2021). Food texture design by 3D printing: A review. *Foods*, 10(2), 320.
- Pires JRA, Souza VGL, Fernando AL. (2018). Chitosan/ montmorillonite bionanocomposites incorporated with rosemary and ginger essential oil as packaging for fresh poultry meat. *Food Packaging and Shelf Life*. 17, 142–149.
- Pirsa, S., Abdolsattari, P., Peighambaroust, S. J., Fasihnia, S. H., Peighambaroust, S. H. (2020). Investigating microbial properties of traditional Iranian white cheese packed in active LDPE films incorporating metallic and organoclay nanoparticles. *Chemical Review and Letters*, 3(4), 168-174.
- Pirsa, S., Alizadeh, N. (2011). Dağıtıcı sıvı-sıvı mikroekstraksiyon yöntemi kullanılarak aromatik hidrokarbonların belirlenmesi için gaz kromatografına bağlı nanoporlu iletken polipirrol gaz sensörü. *IEEE Sensörler Dergisi*, 11 (12), 3400-3405.
- Pirsa, S., Bener, M., Şen, F. B. (2024). Biodegradable film of carboxymethyl cellulose modified with red onion peel powder waste and boron nitride nanoparticles: Investigation of physicochemical properties and release of active substances. *Food Chemistry*, 445, 138721.
- Poyatos-Racionero, E., Ros-Lis, JV, Vivancos, JL ve Martinez-Manez, R. (2018). Gıda israfını azaltmak için akıllı ambalajlamanın bir araç olarak son gelişmeleri. *Temiz Üretim Dergisi*, 172, 3398-3409.
- Quintavalla, S., Vicini, L. (2002). Antimicrobial food packaging in meat industry. *Meat Science*, 62, 373-380.

- Rai, P., Verma, S., Mehrotra, S., Priya, S., Sharma, S. K. (2023). Sensor-integrated biocomposite membrane for food quality assessment. *Food Chemistry*, 401, 134180.
- Rajan, SS ve Wani, KM (2025). Akıllı gıda ve ambalaj teknolojilerinin incelenmesi: beslenme ve sürdürülebilirliği devrimleştiriyor. *Gıda ve İnsanlık*, 4 , 100593.
- Ran, R., Chen, S., Su, Y., Wang, L., He, S., He, B., ... & Liu, Y. (2022). Preparation of pH-colorimetric films based on soy protein isolate/ZnO nanoparticles and grape-skin red for monitoring pork freshness. *Food Control*, 137, 108958.
- Riva, M., Piergiovanni, L., Schiraldi, A., (2000), Performances of Time-Temperature Indicator in the Study of Temperature Exposure of Packaged Fresh Foods, *Pack. Technol. Sci.*, 14: 1-9.
- Robertson, G.L., (2006,), *Food Packaging: Principles and Practice*, Taylor & Francis Group, London, pp. 300-306.
- Ruiz-Navajas, Y., Viuda-Martos, M., Sendra, E., PerezAlvarez, J.A., Fern´andez-L´opez J. (2013). In Vitro antioxidant and antifungal properties of essential oils obtained from aromatic herbs endemic to the southeast of Spain. *Journal of Food Protection*, 76(7), 1218-1225.
- Rukchon, C., Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2014). Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. *Talanta*, 130, 547-554.
- Saatçiođlu, Ö.Y., (2006), RFID Teknolojisi: Fırsatlar, Engeller ve Örnek Uygulamalar, *Ege Akademik Bakış*, 6: 1.
- Salama, H. E., Abdel Aziz, M. S. (2024). Optimized UV-barrier carboxymethyl cellulose-based edible coatings reinforced with green synthesized ZnO-NPs for food packaging applications. *Polymer Bulletin*, 81(18), 16733-16755.
- Salgado, P. R., Di Giorgio, L., Musso, Y. S., Mauri, A. N. (2021). Recent developments in smart food packaging focused on biobased and biodegradable; polymers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 630393.
- Schaude, C., Meindl, C., Fröhlich, E., Attard, J., Mohr, GJ (2017). Gıda bozulması sırasında aminlerin optik tespiti için bir sensör katmanı geliştirme. *Talanta* , 170 , 481-487.
- Schilthuizen, S.F., 1999, Communication with your Packaging: Possibilities for Intelligent Functions and Identification Methods in Packaging, *Pack. Technol. Sci.*, 12: 225-228.
- Selvamuthukumaran, M. (2021). Introduction, Basic Concept, and Design of Active Packaging of Foods. In *Active Packaging for Various Food Applications* (pp. 1-8). CRC Press.
- Serrano-León JS, Bergamaschi KB, Yoshida CMP, Saldaña E, Selani MM. (2018). Chitosan active films containing agro-industrial residue extracts for shelf life extension of chicken restructured product. *Food Research International*. 108, 93– 100.
- Shangguan, S., Afshin, A., Shulkin, M., Ma, W., Marsden, D., & PRICE, F. (2019). Tüketici diyet davranışları ve endüstri uygulamaları üzerindeki gıda etiketleme etkilerinin meta-analizi. *Amerikan önleyici tıp dergisi* , 56 (2), 300-314.
- Sharma, P., Bano, A., Singh, SP, Atkinson, JD, Lam, SS, Iqbal, HM ve Tong, YW (2024). Gıda atıklarının biyogaz ve hidrojen yakıtına biyotransformasyonu – bir inceleme. *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi* , 52 , 46-60.
- Siciliano, S., Lopresto, C. G., Carnì, D. L., Lamonaca, F. (2025). Optical gas sensors in smart food bio-packaging: Innovation for monitoring the product freshness and safety. *Measurement: Food*, 100245.
- Skandamis, P.N., Nychas, G.J.E. (2002). Preservation of fresh meat with active and modified atmosphere packaging conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 79, 35-45.
- Smolander, M., (2003), The Use of Freshness Indicators in Packaging, In: *Novel Food Packaging Techniques*, Edited by
- Taoukis, P.S., Labuza, T.P., (2003), Time-Temperature Indicators, In: *Novel Food Packaging Techniques* , Edited by Ahvenainen R., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 103-126.
- Tebaldi, L., Reverberi, D., Romagnoli, G., Bottani, E., Rizzi, A. (2023). RFID technology in Retail 4.0: state-of-the-art in the Fast-Moving Consumer Goods field. *International Journal of RF Technologies*, 13(2), 105–133.

- Teymouri, Z., Shekarchizadeh, H. (2022). A colorimetric indicator based on copper nanoparticles for volatile sulfur compounds to monitor fish spoilage in intelligent packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100884.
- Tripathi, D., Gupta, T., Pandey, P. (2024). Exploring Piperine: Unleashing the multifaceted potential of a phytochemical in cancer therapy. *Molecular Biology Reports*, 51(1), 1050.
- Üçüncü, M. (2011). Gıda Ambalajlama Teknolojisi. Ambalaj Sanayicileri Derneği İktisadi İşletmesi, İstanbul, Türkiye, 896 s.
- Vasile, C., Baican, M. (2021). Progresses in food packaging, food quality, and safety-controlled-release antioxidant and/or antimicrobial packaging. *Molecules*, 26(5), 1263.
- Wani, K. M., Patidar, R. (2025). Microwave-assisted extraction of pectin from lemon peel powder: Optimization and physicochemical properties. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9, 100223.
- Wen, P., Zhu, D-H., Feng, K., Liu, F-J., Lou, W-Y., Wu, H. (2016). Fabrication of electrospun polylactic acid nanofilm incorporating cinnamon essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex for antimicrobial packaging. *Food Chemistry*, 196, 996-1004.
- Wonder, E. A., Ewert, K. K., Liu, C., Steffes, V. M., Kwak, J., & Safinya, C. R. (2020). Assembly of building blocks by Double-End-Anchored polymers in the dilute regime mediated by hydrophobic interactions at controlled distances. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(41), 45728–45743.
- Xie, Y., Liu, Q., Zhang, W., Yang, F., Zhao, K., & Yuan, Y. (2023). Advances in the potential application of 3D food printing to enhance elderly nutritional dietary intake. *Foods*, 12(9), 1842.
- Xu, H., Zhang, Z., Jiang, W., Fang, X., Xia, Z., & Zhou, H. (2024). Yağ ve su arıtımı için çok fonksiyonlu amfibik süperhidrofilik-oleofobik selüloz nanofiber aerogeller. *Karbonhidrat Polimerleri*, 330, 121774.
- Xu, X., Chen, H., Wang, Q., Su, C., Sun, Y., & Pang, J. (2025). Research progress and future trends in smart response packaging for food preservation. *Journal of Stored Products Research*, 112, 102597.
- Yam, K. L., Takhistov, P. T. and Miltz, J. (2005). Intelligent packaging: concepts and applications. *Journal of Food Science*, R1-R10.
- Yaqoob, U., Younis, M. I. (2021). Chemical gas sensors: Recent developments, challenges, and the potential of machine learning-A review. *Sensors*, 21(8), 2877.
- Yekta, R., Abedi-Firoozjah, R., Azimi Salim, S., Khezerlou, A., Abdolmaleki, K. (2023). Application of cellulose and cellulose derivatives in smart/intelligent bio-based food packaging. *Cellulose*, 30(16), 9925-9953.
- Yıldırım, S., Röcker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., & Coma, V. (2018). Active packaging applications for food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 165-199.
- Yu, Z., Jung, D., Park, S., Hu, Y., Huang, K., & Chen, J. (2020). Smart traceability for food safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(4), 905–916.
- Zakaria, S. A., Ahmadi, S. H., Amini, M. H. (2022). Alginate/dye composite film-based colorimetric sensor for ammonia sensing: Chicken spoilage. *Food Control*, 147, 109575.

Nasıl Atıf Yapılır?:

Yıldırım Ayaydın T., Dursun Çapar T. (2026) Aktif ambalajlama uygulamaları ve akıllı ambalaj teknolojileri ile izlenebilirlik uygulamalarının gıda güvenliği üzerindeki etkileri. *GIDA* (2026) 51 (3) 555-582 doi: 10.15237/gida.GD26004

Cite this article as:

Yıldırım Ayaydın T., Dursun Çapar T. (2026) *The effects of active packaging applications and intelligent packaging technologies with traceability systems on food safety.* *GIDA* (2026) 51 (3) 555-582 doi: 10.15237/gida.GD26004