



Gıdalarda Akıllı Ambalajlama Teknolojileri ve Uygulamaları

Tuğba ÇELİK¹, Sevim KARASUNGUR², Alev Emine İNCE^{3*}

^{1,2}Başkent Üniversitesi, Gıda, Tarım ve Hayvancılığı Geliştirme Enstitüsü, Ankara, TÜRKİYE

³Başkent Üniversitesi, Kahramankazan Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Gıda Kalite Kontrolü ve Analizi Programı, Ankara, TÜRKİYE

¹<https://orcid.org/0009-0005-7124-1754>, ²<https://orcid.org/0009-0006-7790-1044>, ³<https://orcid.org/0000-0002-8952-4913>

Corresponding author: alevince@baskent.edu.tr

Derleme Makalesi

ÖZET

Tarihçe:

Geliş tarihi: 23 Ekim 2024

Kabul tarihi: 11 Kasım 2024

Online yayınlanma: 15 Aralık 2024

Anahtar Kelimeler:

Aktif ambalaj

Gösterge

Sensör

Raf ömrü

Gıdalarda raf ömrü, gıdanın üretildiği zaman ile tüketici tarafından kabul edilemez hale geldiği zaman arasında geçen süre olarak tanımlanır. Bu duruma bazen gıdalarda gelişen bakteri, küf ve mayaların gıdadaki enerji kaynaklarını kullanarak ortaya çıkardıkları metabolitler neden olurken bazen de gıdanın sıcaklık, pH değeri, su aktivitesi, bazı gazların varlığı (etilen, oksijen, karbondioksit vb.) neden olur. Gıda ambalajları nakliye, depolama ve tüketime kadar gıdaların kalitesini korumak için uygulanan ana işlemlerden biridir. Gıda ürün çeşitlerinin artışı ve ürünlerin lojistiğinin giderek daha kapsamlı ve karmaşık bir hale gelmesi sonucu belirtilen raf ömrünü, ürün kalitesini, besleyici değerini ve gıda güvenliğini sağlamak için gıdaların ambalajlanmasında yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmuştur. Bu derlemede, gıdalarda kullanılan aktif ve akıllı ambalajlama sistemleri, bu sistemlerin çalışma prensipleri, geliştirilen akıllı ambalajlar ve gıda uygulamaları hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Smart Packaging Technologies and Applications in Foods

Review Article

ABSTRACT

History:

Received: 23 October 2024

Accepted: 11 November 2024

Published online: 15 December 2024

Keywords:

Active packaging

Indicator

Sensor

Shelf life

The shelf life of food is defined as the time between when the food is produced and when it becomes unacceptable to the consumer. This is sometimes caused by the metabolites produced by bacteria, molds and yeasts that grow in foods using the energy sources in the food, and sometimes by the temperature, pH value, water activity, the presence of certain gases (ethylene, oxygen, carbon dioxide, etc.). Food packaging is one of the main processes applied to preserve the quality of food from transportation, storage and consumption. The increase in the variety of food products and the increasingly extensive and complex logistics of products have resulted in the need for new technologies in food packaging to ensure specified shelf life, product quality, nutritional value and food safety. In this review, information about active and smart packaging systems used in foods, the working principles of these systems, developed smart packaging and food applications are given.

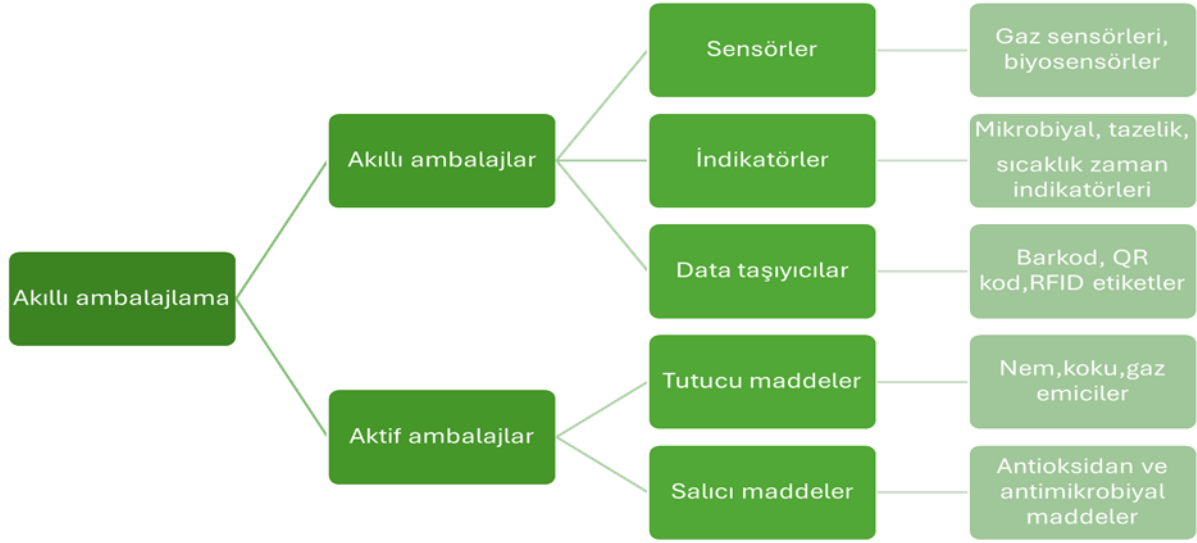
To Cite :

Çelik T, Karasungur S, İnce AE., 2024. Smart Packaging Technologies and Applications in Foods. Journal of Agriculture, Food, Environment and Animal Sciences, 5(2): 261-289.

GİRİŞ

Paketleme ya da ambalajlama, ürünlerin korunması ve bilgilerinin yer aldığı bir kaplama sistemidir. Bir ambalajın, temel olarak bir ürünün zarar görmeden nihai tüketiciye varıncaya kadar olan tüm iletim zinciri sürecinde ürünü korunması ve ürün bilgisini/etiketini taşıması gerekir. Geleneksel ambalajlar öncelikle gıda ürünlerini nem, ışık ve fiziksel hasar gibi dış faktörlerden korumak amacıyla pasif bir bariyer olarak tasarlanmıştır (Drago ve ark., 2020). Geleneksel ambalajlama yönteminde ürünün sadece dış etkenlerden korunması yeterliydi. Ancak bu pasif bariyerler gıdanın kalitesini korumakta ve raf ömrünü uzatmakta yetersiz kaldığı için, gıda ambalajları konusunda yeni teknoloji arayışları ortaya çıkmıştır. Tüketici talepleri, teknolojinin ilerlemesi ve gıda endüstrisinin eğilimleri doğrultusunda gıda ambalajlama teknolojileri sürekli olarak gelişmektedir. Çünkü, hammadde tedariki ve gıda ürünlerinin taşınması sırasında yaşanabilecek kayıpların önlenmesi gerekmektedir (Inamuddin ve ark., 2023). Gıda ürünlerinin lojistiğinin giderek daha kapsamlı ve karmaşık bir hale gelmesi sonucu belirtilen raf ömrünü uzatmak, ürün kalitesini, gıdanın besleyici değerini korumak ve gıda güvenliğini sağlamak amacıyla ambalajlama teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Ambalajın ürünün muhafazası dışında aroma kaybını önlemek, mikrobiyolojik koruma sağlayarak raf ömrünü uzatmak, ürün ile tüketici arasındaki iletişimi sağlamak gibi çeşitli işlevleri kapsamı da beklenmektedir (Şahin ve Konuk, 2019). Modern ambalajlamada ise, aktif ve akıllı ambalajlama teknolojileri gıda koruma alanında dinamik rol oynayacak aktif fonksiyonlara sahiptir. Aktif fonksiyonlar, ambalajın gıda ve çevresiyle olan etkileşimini kapsar, böylece gıda güvenliği ve kalitesini dağıtım zinciri ve raf ömrü boyunca korumayı hedefler (Drago ve ark., 2020). Geleneksel paketleme pasif ve inert iken modern ambalaj teknolojileri aktif ve dinamiktir. Son yıllarda ambalajların akıllı ambalaj özelliğinin kazandırılmasıyla ürün ve çevresel değişiklikleri izlemek ve tespit etmek için sensörler, göstergeler gibi gelişmiş teknolojilerin kullanılması ürünün kalite, tazelik ve güvenliği hakkında tüketiciye gerçek zamanlı veri sağlamaktadır. (Şahin ve Konuk, 2019).

Akıllı ambalajlama sistemleri gıda kaybını ve israfını en aza indirmek, gıda koruyucu katkı maddelerinin kullanımını azaltmak ve tüketici memnuniyetini sağlamak amacıyla günümüzde tercih edilmektedir (Inamuddin ve ark., 2023). Akıllı ambalajlama sistemleri çalışma prensibi bakımından ikiye ayrılır. Bunlar aktif ambalajlama ve akıllı ambalajlamadır. Şekil 1’de akıllı ambalajlama sisteminin sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 1. Akıllı ambalajlama sistemlerinin sınıflandırılması (Vasuki ve ark., 2023)

Genel olarak, aktif ambalajlama malzemeleri mikrobiyal büyümeyi kontrol etmek, oksijen ve nem seviyelerini düzenlemek, etileni ortamdan uzaklaştırmak veya tadı, aromayı korumak için gıda ürünü veya çevresiyle aktif olarak etkileşime girmektedir (Vasuki ve ark., 2023). Aktif ambalajlamadaki bu etkileşimler sayesinde gıda kalitesi korunmakta ve tedarik zincirindeki gıda kayıpları azaltılmaktadır. Şekil 2’de her bir tedarik zincirinde ürün gruplarındaki kayıplar gösterilmiştir (Chen ve ark., 2020). Bu kayıplar ürünlerin kendisinde olabildiği gibi, taşıma, dağıtım ve depolama sırasında da olabilir. Ürün gruplarına göre değerlendirildiğinde en yüksek kayıplar meyve ve sebzelerde görülmektedir.

Ürün Kayıpları	Taşıma ve Depolama Kayıpları	Üretim Ambalajlama Kayıpları	Dağıtım Kayıpları	Tüketici Kayıpları
<ul style="list-style-type: none"> •Tahıllarda(%2) •Su •Ürünlerinde(%11) •Meyve ve Sebzelerde(%20) •Et (%3) •Süt (%0.35) 	<ul style="list-style-type: none"> •Tahıllarda(%2) •Su •Ürünlerinde(%5) •Meyve ve Sebzelerde(%3) •Et (%2) •Süt (%0.25) 	<ul style="list-style-type: none"> •Tahıllarda(%10) •Su •Ürünlerinde(%5) •Meyve ve Sebzelerde(%1) •Et (%3) •Süt (%0.5) 	<ul style="list-style-type: none"> •Tahıllarda(%2) •Su •Ürünlerinde(%9,5) •Meyve ve Sebzelerde(%12) •Et (%4) •Süt(%0.35) 	<ul style="list-style-type: none"> •Tahıllarda(%27) •Su •Ürünlerinde(%33) •Meyve ve Sebzelerde(%28) •Et(%12) •Süt(%17)

Şekil 2. Gıda gruplarında tedarik zincirinde yaşanan ürün kayıpları (Chen ve ark., 2020)

AKTİF AMBALAJLAMA

Aktif ambalajlama, gıda kalitesini artırmaya, raf ömrünü uzatmaya ve ürünü daha uzun süre uygun koşullarda tutarak israfı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Aktif ambalaj, ambalajlanan ürünlerle doğrudan etkileşime girerek kalitelerini artıran ve koruyan, aynı zamanda raf ömürlerini uzatan bir ambalajlama teknolojisidir. Bu tür

ambalajlama, iç ambalajlama ortamını ürün için uygun kılmak amacıyla aktif olarak etkileşime girerek ürünü koruma işlevini yerine getirmektedir (Lydekaityte ve Tambo, 2020). Aktif ambalajlama teknolojisinde aktif maddeler ambalaj içerisine film olarak, kese halinde veya ara tabaka olarak ambalaja eklenebildikleri gibi yenilebilir film olarak gıdalara kaplama, daldırma ve püskürtme gibi yöntemlerle de uygulanabilmektedir (Khan ve ark., 2023).

Aktif ambalajlama sistemleri, genel olarak gıdanın bozulması sonucunda oluşan uçucu gaz bileşenlerinin, gıdaya içine emilimini veya aktif reaksiyon sonucu bertarafını sağlamak üzerine kurulmuştur. Gıdanın çevresiyle olan etkileşimini minimumda tutarak gıdaya ait koku ve nem kaybının önlenmesi gıdanın tekstüründe gelişen yumuşama ya da sertleşme gibi özelliklerin önlenmesi amacıyla çeşitli kompozit materyallerle denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde temel amaç, hem lojistik sırasında yaşanan gıda kayıpları önlenmekte hem de gıdanın son tüketiciye istenen kalitede ulaştırılması sağlanmaktadır. Aktif ambalaj materyalleri bir ambalaja entegre edilebildiği gibi yenilebilir kaplama olarak doğrudan ürüne de uygulanabilmektedir. Son yıllarda yenilebilir kaplamalarda indikatör özelliği gösteren antosiyanin içeren bitkilerden elde edilen boyaların kullanılması sayesinde sensör ile algılanabilen film kaplamaları yaygınlaşmıştır (Kuswandi ve ark., 2011). Gıda atıkları üzerinde yapılan çalışmalardan kestane kabuğu atığından elde edilen ekstraktların zein nanopartiküllerle güçlendirilerek pektin veya jelatin matrikslerine işlenmesiyle oluşturulan filmlerin düşük oksijen geçirgenliği yüksek termal stabilitesi ve doğada yüksek parçalanabilirliği nedeniyle biyokompozitlerde kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve bunun sonucunda da gıda atıklarından elde edilen antimikrobiyal özellikteki ekstraktların nanokompozitlerde biyobozunur ambalaj yapımında önemli bir yere sahip olacağı düşünülmüştür (Romani ve ark., 2017).

Aktif Ambalajlama Materyallerinin Fonksiyonel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Mikrobiyal Kontrol

Aktif ambalaj malzemeleri antimikrobiyal ajanları serbest bırakarak veya mikrobiyal büyümeyi teşvik eden oksijen veya nem gibi istenmeyen bileşiklerle kimyasal tepkimeye girerek ortamdaki üremeyi kontrol altına almaktadır. Meyve ve sebzelerde özellikle dağıtımdaki yanlış işlemler nedeniyle *Bacillus cereus*, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Shigella* gibi bakterilerin çoğalması sonucu gerçekleşen bozulmalar ve patojen etkiler yaşanmaktadır. Mikrobiyal aktiviteyi engelleyerek bozulmanın önlenmesine yardımcı olmak ve gıda ürünlerinin raf ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli antimikrobiyal ürünler kullanılmaktadır. Örneğin; Rosella ekstraktı ile zenginleştirilmiş Arap zamkı kaplaması yaban mersininde kullanılarak maya ve

mezofilik bakterilerin popülasyonunu azaltmış ve $4 \pm 0,5$ °C'de aralığında raf ömrünün 12 gün uzamasını sağlamıştır (Vasuki ve ark., 2023).

Oksijen Emilimi

Oksijen varlığı, özellikle yağ içeriği yüksek gıdalarda oksidasyona ve ekşimeye yol açmaktadır. Ayrıca aerobik bakterilerin gelişimine neden olduğundan, renk pigmentlerinde ve tekstürde istenmeyen değişimlere de yol açmaktadır. Aktif ambalaj malzemeleri, ambalaj içindeki fazla oksijeni emen, oksidatif reaksiyonları azaltan ve gıdanın kalitesini koruyan oksijen tutucuları içererek ürünün muhafazasını sağlamaktadır. Bir çalışmada buğday proteini bazlı yosun eklenmiş film ile kaplanan tavukgöğsünün raf ömrü, filmin oksijen tutma özelliği sayesinde $4 \pm 0,5$ °C'de 25 gün uzatılmıştır (Vasuki ve ark., 2023).

Nem Düzenlemesi

Taze meyve ve sebzelerdeki yüksek su aktivitesi ve nem gıdanın raf ömrünün uzatılması ve kalitenin korunmasında bazı sorunlara yol açmaktadır (Sultana ve ark., 2022). Su aktivitesinin ve nemin yüksek olması, mikrobiyal çoğalmayı hızlandırdığı gibi gıda ürünlerinde tekstürel değişikliklerine de neden olmaktadır. Bu değişiklikler, çoğu gıda ürünüde istenmeyen bir durumdur. Nem emici özelliklere sahip aktif ambalaj malzemeleri, ambalaj içindeki nem seviyelerinin düzenlenmesine, neme bağlı bozulmaların önlenmesine ve ürün kalitesinin korunmasına yardımcı olarak raf ömrünü uzatmaktadır (Inamuddin ve ark., 2023). Günümüzde mikro gözeneklere sahip aktif metal organik çerçeve formülasyonlu aktif ambalaj materyalleri sayesinde ambalaj içindeki bağıl nem geleneksel ambalajlama materyallerine göre %10 daha fazla tutulabilmektedir. Demir iyonu katkılı jelatin ve kitosan ambalajların elma küplerinde kaplama materyali olarak kullanıldığı çalışmada nem oranını kontrol altında tutarak raf ömrünü 25°C'de 5 gün uzattığı kaydedilmiştir. (Sultana ve ark., 2022).

Etilen Emilimi

Bazı aktif ambalaj malzemeleri, meyve ve sebzelerde olgunlaşmayı ve yaşlanmayı hızlandıran doğal bir bitki hormonu olan etileni absorbe edecek şekilde tasarlanmıştır. Aktif paketleme, ambalaj içerisindeki etilen seviyelerini azaltarak olgunlaşma sürecini yavaşlatarak çabuk bozulan ürünlerin tazeliğinin korunmasında kullanılmaktadır (Drago ve ark., 2020). Potasyum permanganat (KMnO₄) içeren tritikale aktif filminin çeri domateslerde kullanıldığı bir çalışmada çeri domateslerin oda sıcaklığı (23 ± 2 °C) ve 4°C'de raf ömrünün 20 güne kadar uzadığı belirtilmektedir (Aragüez ve ark., 2020). Bir başka çalışmada ise marula zeolite içeren aktif film kaplaması yapılarak maruldaki renk değişimi ve yumuşama $4 \pm 0,5$ °C'de 21 güne kadar önlenmiştir (Vasuki ve ark., 2023).

Lezzet ve Aromanın Korunması

Aktif ambalaj malzemeleri aynı zamanda lezzet artırıcıları serbest bırakarak veya kötü kokuları absorbe ederek gıda ürünlerinin duyuşsal özelliklerinin korunmasına yardımcı olmaktadır (Ahmed ve ark.,2017). Meyve suyu endüstrisinde kullanılan ambalajlarda iyon değiştirme özelliği bulunan adsorbentler, iyonik özellik gösteren aroma bileşenlerini de etkileyebilir. Örneğin turunçgil sularının kendine özgü acılık veren bileşenleri ambalaj materyalindeki aktif karbon veya zeolite tarafından absorbe edilmektedir. Bu durumda, ambalaj içine gıdanın karakteristik aromasını yayan aroma salıcılar yerleştirmektedir (Karagöz ve Demiröven, 2017).

Antioksidan Salınımı

Gıdaların raf ömürlerinin uzatılması ve oksidasyonun önlenip gıdanın kalite ve güvenliğinin sağlanması amacıyla yenilebilir film, kaplama veya ambalaj içinde koruyucu katman olarak eklenip aktif ambalajlama teknolojisinde antioksidanlar sıklıkla kullanılmaktadır (Bonilla ve ark., 2013). Geleneksel yöntemde gıdanın formülasyonuna eklenen antimikrobiyal özellikli bazı bitki özütleri ve baharatlar ambalajlarda da kullanılabilir. Örneğin; ıspanakta ve portakalda doğal olarak bulunan lutein ve kavun ve guava gibi sarı meyvelerde bulunan zeaksantin antioksidan ajan olarak aktif film formülasyonlarında kullanılmaktadır (Inamuddin ve ark., 2023).

Antioksidanlar hem enzimatik renk değişim reaksiyonlarının geciktirilmesi hem de lipid oksidasyonunun önlenmesi amacıyla çeşitli gıda ürünlerinin paketlenmesinde kese veya film tabaka olarak kullanılmaktadır. Antioksidanların çalışma mekanizmalarının bilinmesi aktif film formülasyonlarında kompozit oluşturulmasındaki rolü açısından önemlidir. Çalışma mekanizmalarına göre antioksidanlar serbest radikal tutucular, UV absorbanlar, tekli oksijen bağlayıcılar, çelat oluşturanlar ve oksijen tutucular olarak farklı gruplarda değerlendirilmektedir (Inamuddin ve ark., 2023; Irimia ve ark., 2024). Antioksidanlar sentetik ve doğal yollarla elde edilebilir. Bütillenmiş hidroksi tolüen, bütillenmiş hidroksi anisol, propil glikol, EDTA sentetik antioksidanlara, karotenoid, tokoferol, sitrik asit, polifenoller ise doğal antioksidanlara örnek olarak verilebilir.

Farklı Gıdalarda Kullanılan Aktif Ambalajlar

Aktif ambalajlar, nem kontrolü, bakteri ve küf gelişiminin önlenmesi, lipid oksidasyonunu önleme gibi farklı fonksiyonlara sahip olabilir. Bu fonksiyonların önemi ürün gruplarına göre değişmektedir. Örneğin meyve ve sebzelerde nem

kontrolü oldukça önemliyken, yağlı tohumların ambalajlanmasında oksidasyonunun önlenmesi daha ön plandadır.

Tablo 1. Meyve ve sebzelerde aktif ambalajlama örnekleri

Ambalaj tipi	Kullanım amacı	Kullanılan reaktif	Kullanılan ürün	Kaynak
Etilen tutucular (film, kese)	Hızlı olgunlaşma ve yumuşamayı önlemek	Alüminyum oksit, çinko oksit içeren film	Yeşil Üzüm	Kumar ve ark., 2019
		Potasyum permanganat kesesi (kese)	Guava	Aragüez ve ark., 2020
		Aktif karbon ve metal katalizör kesesi (kese)	Kivi	Wei ve ark., 2021
		Kitosan ve titanyum dioksit içeren film	Mantar	Khan ve ark., 2023
Nem tutucular (tabaka, film, kese)	Gıdalardaki fazla nemi kontrol altında tutarak küf, maya ve bakteri gelişmesini engellemek için su aktivitesini düşürmek	Zeolit, Kil, Japon oya ağacı kompozit film	Taze Meyveler	Siripatrawan ve ark., 2018)
		Poliakrilat tabakalar	Muz	Gaikwad ve ark., 2020
		Propilen glikol içeren film	Meyve ve Sebzeler	Upadyay ve ark., 2024
Karbondioksit salıcılar (kese)	Gram negatif bakteriler ve küflerin gelişmesini önlemek	Silika jel kesesi	Guava	Murmu ve Mishra, 2023
		Kil kesesi	Meyve ve Sebzeler	Khan ve ark., 2023
		Askorbik asit	Meyve ve Sebzeler	Stoycheva ve ark., 2014
Kükürt dioksit salıcılar Antimikrobiyal koruyucular	Küf gelişimini engellemek	Sodyum bikarbonat	Meyve ve Sebzeler	Drago ve ark., 2020
		Askorbat	Meyve ve sebzeler	Pereira ve ark., 2023
		Mikroporöz materyallerle birleştirilmiş sodyum metabisülfat	Meyve ve Sebzeler	Ahmed ve ark., 2020
		Organik asitler	Meyve ve Sebzeler	Sultana ve ark., 2022
Antimikrobiyal koruyucular	Bozulmaya neden olan ve patojen bakterilerin gelişimini engellemek	Allilizo tiyosiyonat	Meyve ve Sebzeler	Drago ve ark., 2020
		Gümüş ve zeolit çerçeve	Meyve ve Sebzeler	Sultana ve ark., 2022
		Lizozim enzimi	Meyve ve Sebzeler	Drago ve ark., 2020
		Tarçın ve zencefil yağı kullanımı	Meyve ve Sebzeler	Pereira ve ark., 2023
		Metilselüloz film içerisine kekik, yenibahar limon otu karışımı kullanımı	Meyve ve Sebzeler	Silva -Periera ve ark., 2015

Meyve ve Sebzeler

Meyve sebzelerdeki ana hedef lojistik ve depolamadaki kayıp oranını azaltmaktır. Meyve ve sebzeler taşımacılık sırasında ısı, ışık, oksijen miktarı, nem miktarı gibi fiziksel koşullara duyarlı gıdalardır (Ribeiro-Santos ve ark.,2024). Meyve ve sebzelerde etilen tutucu, nem tutucu, karbondioksit salıcı, kükürt dioksit salıcı ve antimikrobiyal özellik gösteren olmak üzere 5 farklı aktif ambalaj kategorisi bulunmaktadır. Tablo 1’de meyve ve sebzelerde kullanılan aktif ambalaj çeşitlerine örnekler verilmektedir. Etilen tutucular genellikle olgunlaşmanın gecikmesi amacıyla, taşıma süresinin uzun olduğu durumlarda etkili olmaktadır.

Tablo 2. Et ve et ürünlerinde aktif ambalajlama örnekleri

Ambalaj tipi	Kullanım amacı	Kullanılan reaktif	Kullanılan ürün	Kaynak
Oksijen tutucular	Küf, maya ve aerobik bakteri gelişimini azaltmak, önlemek; yağ, vitamin ve renk maddelerinin oksidasyonunu engellemek	Demir bileşikleri	Sığır Eti	Ahmed ve ark., 2020
		Askorbik asit, Tokoferol	Sığır eti	Drago ve ark., 2020
		Metal Tuzları	Sığır eti	Inamuddin ve ark., 2023
		Glikoz /alkol oksidaz	Sığır eti	Inamuddin ve ark., 2023
Karbondioksit tutucular	Depolama sırasında oluşan karbondioksiti tutmak	Yeşil çay özütü	Sığır eti	Pereira ve ark., 2023
		Kalsiyum hidroksit	Sığır eti	Kuswandi ve ark., 2020
		Potasyum hidroksit	Sığır eti	Drago ve ark., 2020
		Silika jel	Sığır eti	Kuswandi ve ark., 2020
Nem tutucular	Gıdalardaki fazla nemi kontrol altında tutarak küf, maya ve bakteri gelişmesini engellemek için su aktivitesini düşürmek.	Poliakrilatlar(tabaka)	Sığır Eti	Drago ve ark., 2020
		Propilen glikol(film)	Sığır Eti	Drago ve ark., 2020
		Silika jel(kese)	Sığır Eti	Pereira ve ark., 2023
		Kil(kese)	Sığır eti	Pereira ve ark., 2023
Karbondioksit salıcılar	Gram negatif bakteriler ve küflerin gelişmesini önlemek	Askorbik asit	Et ürünleri	Drago ve ark., 2020
		Sodyum bikarbonat	Et ürünleri	Drago ve ark., 2020
		Askorbat	Sığır Eti	Drago ve ark., 2020
Antimikrobiyal koruyucular	Escherichia coli ve Listeria Monocytogens bakterilerinin oksidasyonunu önlemek	Allitrazin ile kitosan	Sığır Eti	Vasuki ve ark., 2023
Antioksidan salıcılar	Lipid oksidasyonunu önlemek	Yosun ekstraktı ile buğday proteini	Sığır Eti	Perez - Gago ve ark., 2002

Nem tutucular ise, raftaki ürünün mikrobiyolojik açıdan stabil kalmasını sağlamak ve böylece raf ömrünü uzatmak amacıyla daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Patojen bakterilerin gelişimini önlemek amacıyla antimikrobiyal koruyucular ve özellikle küf gelişimini önlemek amacıyla da karbondioksit ve kükürt dioksit salıncılar kullanılmaktadır.

Et ve Et Ürünleri

Et ve et ürünlerindeki en büyük risk taşıma ve depolama sırasında patojen mikroorganizmaların üremesidir. Patojenlerin üremesinde nem oranı ve oksijen miktarı önemli olduğundan, aktif ambalajda da bu parametrelerin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Tablo 2’de et ve et ürünlerinde kullanılan aktif ambalajlamalara örnekler verilmektedir. Bu çalışmaların çoğu mikrobiyal gelişimi önlemek için oksijen ve nem tutma üzerinedir.

Su Ürünleri

Su ürünlerinin ambalajlanmasında daha çok Omega-3 doymamış yağ asitinin lipid oksidasyonundan korunması ve kötü kokunun absorbe edilmesi hedeflenmektedir. Böylece besin değeri korunun su ürünlerinin acılaşması önlenerek raf ömrü uzatılmaktadır. Tablo 3’te su ürünlerinde kullanılan aktif ambalajlama örnekleri yer almaktadır.

Tablo 3. Su ürünlerinde aktif ambalajlama örnekleri

Ambalaj tipi	Kullanım amacı	Kullanılan reaktif	Kullanılan ürün	Kaynak
Oksijen tutucu	Oksidasyonu önlemek	Allirazin eklenmiş kitosan filmi	Balık eti	Vasuki ve ark., 2023
Koku ve tat düzenleyici	Kötü kokuyu absorbe etmek	Nikel ve aktif kömür eklenmiş film Patates kabuğundan sentezlenen selüloz nanopartikülleri polivinil alkol bazlı film	Balık eti Balık eti	Inamuddin ve ark., 2023 Vasuki ve ark., 2023
Antibakteriyel madde kullanımı	Mikroorganizma gelişimini engellemek ve kokuyu baskılamak	Tarçın nanofitozom yerleştirilmiş nano fiber film	Karides	Vasuki ve ark., 2023

Fırıncılık Ürünleri

Fırıncılık ürünlerinde nem ve sıcaklık nedeniyle en çok küf, maya ve küf toksini ile ilgili ambalajlama sorunları yaşanmaktadır. Ambalajlamada uygulanan reaktifler daha çok antimikrobiyal aktif maddelerdir. Tablo 4'te Fırıncılık ürünlerinde kullanılan aktif ambalajlamalara örnekler yer almaktadır.

Tablo 4. Fırıncılık ürünlerinde aktif ambalajlama örnekleri

Ambalaj Tipi	Kullanılan reaktif	Kullanım amacı	Kullanılan ürün	Kaynak
Anti mikrobiyal salıcı	Sarımsak ekstraktı	Küf, maya ve bakteri gelişimini engellemek	Ekmek	Drago ve ark., 2020
	Polilaktikasit ve timol	<i>Aspergillus</i> ve <i>Penicillium</i> türlerinin gelişimini engellemek	Ekmek	Langrodi ve ark., 2023
	Sinnamaldehit	Bakteri gelişimini engellemek için	Ekmek	Vasuki ve ark., 2023

Süt ve Süt Ürünleri

Süt ve süt ürünleri yüksek protein içerikli ve ışığa karşı hassas oldukları için ambalajlama materyallerinde alüminyum tabaka kullanımı ile UV ışığın etkilerinden ürün korunmakta, antimikrobiyal ürünlerin ambalaja entegre edilmesiyle ise raf ömrü uzatılmaktadır. Tablo 5'te Süt ürünlerinde kullanılan aktif ambalajlama örnekleri yer almaktadır.

Tablo 5. Süt ve süt ürünlerinde aktif ambalajlama örnekleri

Ambalaj Tipi	Kullanılan reaktif	Kullanım amacı	Kullanılan ürün	Kaynak
Anti mikrobiyal salıcı	Kalsine mercan tozlu film	<i>Escherichia</i> ve <i>Staphylococcus</i> türlerine karşı koruma sağlamak	Süt	Vasuki ve ark., 2023
	Natamisin içeren film	<i>Candida</i> ve <i>Rhodotorula</i> türlerine karşı koruma sağlamak	Peynir	Vasuki ve ark., 2023
	Kitosan ve TiO ₂ film	Küf ve mayalara karşı koruyuculuk	Süt	Khan ve ark., 2023
UV ışını tutucular	Şeker yosunu ve kitosan filmi Sandal ağacı yağı ve kitosan filmi	Lipid oksidasyonunu önlemek	Yoğurt	Alizadeh Sani ve ark., 2024

Süt ve süt ürünlerinde mikrobiyal gelişme çok hızlı olabildiğinden, ambalajlarda antimikrobiyal içerikler sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak natamisin gibi antibiyotik

içeriklerin salınımları sütün özellikle fermantasyon sırasında fonksiyonel özelliklerini kötü etkileyebilmektedir. Bu nedenle, kullanılacak antimikrobiyallerin salınım hızları ve hangi tür ürünlerde kullanılacağı iyi belirlenmelidir.

Süt ürünlerinde sıklıkla görülen bir diğer kalite kaybı lipid oksidasyonu ile gerçekleşmektedir. Oksijenle teması kesmek, antioksidan materyal kullanmak veya UV ışınlarını engellemek lipid oksidasyonunu geciktirmektedir. Çeşitli film uygulamalarıyla hem oksidasyonu engelleme hem de antimikrobiyal özellik gibi farklı özellikler bir araya getirilebilmektedir.

Aktif Ambalajların Üretim Materyaline Göre Sınıflandırılması

Aktif ambalajlar, üretim materyaline göre lipid, polisakkarit ve protein temelli olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Polisakkaritler düşük maliyetli, oksijen geçirgenliği düşük, kokusuz ve renksiz polimer matriksleri oluşturma kabiliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. Lipidler hidrofobik ve stabilizatör özellikleri ile gıdanın su oranını kontrol altına alabilen termal dayanıklılığa sahip matriksler oluşturabilmektedir. (Holcapkova ve ark.,2018) Proteinler ise hidrojen bağları, hidrofobik etkileşimler ve disülfid bağları ile stabilize edilen ve güçlendirilebilen üç boyutlu makromoleküler ağlar oluşturma kabiliyetleri nedeniyle tercih edilmektedir (Romani ve ark., 2017).

Gıdalarda aktif ambalaj olarak kullanılan polisakkaritlerin fonksiyonel özellikleri aşağıda verilmiştir:

Polisakkaritler:

- Pektin: Jelleştirici ve kıvam arttırıcı olarak kullanılan meyve ve sebzelerin hücre duvarından elde edilen doğal bir polisakkarittir.
- Nişasta: Filmlere mekanik mukavemet özelliği kazandırmada kullanılan mısır, buğday ve patates gibi bitkilerden elde edilen düşük maliyetli yaygın olarak bulunan bir polisakkarittir (Sultana ve ark., 2022).
- Aljinat: Nem tutucu ve jelleştirici oluşu nedeniyle kullanılan, kahverengi deniz yosunlarından elde edilen bir polisakkarittir.(Ahmed ve ark.,2017)
- Karragenan: Stabilizatör ve kıvam arttırıcı özellikleri nedeniyle kullanılan kırmızı deniz yosunlarından elde edilen bir polisakkarittir.
- Ksantan Sakızı: Stabilizatör olarak kullanılan *Xanthomonas campestris* bakterileri tarafından sentezlenen bir polisakkarittir.

Lipidler:

- Wax: Mekanik ve termal dayanıklılık sağlaması nedeniyle kullanılır.
- Esansiyel yağlar: Antimikrobiyal özellik göstermesi nedeniyle kullanılır.
- Lesitin: Stabilizatör özelliği nedeniyle kullanılır.

Proteinler:

- Zein: Antioksidan özelliği nedeniyle kullanılan mısır proteininden elde edilen bir poliamindir.(Mohamed ve ark.,2020)
- Kazein: Stabilizatör olarak kullanılır.
- Buğday proteinleri: Oksijen bariyeri olarak kullanılır.

Tablo 6: Yenilebilir kaplamalar ve etki mekanizmalarına örnekler

Gıda	Ambalaj çeşidi	Etki mekanizması	Kaynak
Süt	Akıllı ambalajlama	Siyah havuç antosiyaninleri nişasta matrisi içine yerleştirilerek sensör yardımıyla tazelikle ilgili bilgi verir Kırmızılahanadan elde edilen antosiyaninin agar matrisine yerleştirilmesi sonucu oluşan kolorimetrik sensör laktik asite tepki vererek bozulma hakkında gerçek zamanlı bilgi verir.	Goodarzi ve ark., 2020 Weston ve ark., 2020
Domuz eti	Akıllı ambalajlama	Mor tatlı patatesten elde edilen doğal antosiyaninler yardımıyla bozulma sonucu değişen pH'nın kolorimetrik olarak ölçülmesiyle bozulma derecesi hakkında bilgi verir	Choi ve ark., 2017
Balık eti	Akıllı ambalajlama	Bozulma sonucu oluşan Toplam uçucu bazik azot (TBV-N) difüzyonunu tespit eden Mohr Tuzu bazlı bozulma indikatörlü film kolorimetrik olarak ölçülüp bozulma hakkında bilgi verir	Nopwinyuwong, 2010

Gıdanın raf ömrünü uzatmakta petrokimya ürünlerine göre fonksiyonel, sürdürülebilir ve ihtiyaca göre özelleştirilebilir olan yenilebilir filmler gıda endüstrisi için yenilikçi teknolojiler arasında yer almaktadır. Jelatin, pektin ve gellan sakızı gibi yenilebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir bileşenler antosiyanin gibi renk değiştiren bozulma ürünlerine duyarlı yenilebilir sensör olarak, bozulmayı tespit edebilmektedir (Inamuddin ve ark., 2023). Örneğin; doğal bir iridoid olan genipinin kullanımıyla hem oksijen hem de biyojen amin tespiti kolorimetrik olarak başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir (Drago ve ark., 2020). Başka bir çalışmada ise ıspanak, kırmızı turp, siyah pirinç ve kış yasemininden elde edilen antosiyaninlerin biyojen aminlerin ölçülmesindeki etkileri karşılaştırılmış ve denenen doğal pigmentler arasında bozulma sonucu oluşan aminlerin tespitinde en hassas kolorimetrik sensörün siyah pirinç olduğu bulunmuştur (Mohebi ve ark., 2015). Kolorimetrik sensörler akıllı telefon teknolojileri ile birleştirilerek laboratuvarlardaki spektrometrik analizlere alternatif olarak bozulma tespitini sağlayabileceği düşünülmektedir (Weston ve ark., 2020). Tablo 6'da yenilebilir kaplamalar ve etki mekanizmaları ile ilgili çeşitli örneklere yer verilmiştir.

AKILLI AMBALAJLAMA

Teknolojik gelişmeler ve tüketici istekleri ile doğru orantılı olarak ambalajlama sistemlerinden beklenen veriler de değişkenlik göstermektedir ve bu durum akıllı ambalaj sistemlerinde olan ihtiyacı artırmaktadır. Akıllı ambalajlama, ürün bilgilerini takip etmek, gıdaların iç ve dış faktörlerden etkilenmesi nedeniyle sağlıklı tüketime uygun olup olmadığını görüntüleyebilmek, pH-sıcaklık-oksijen gibi parametrelerdeki değişimleri algılamak; üreticiye ve tüketiciye veri iletmek amaçlarıyla tasarlanmıştır. Akıllı ambalajlama teknolojileri, ayrıca markalaşma sürecini hızlandırmakta ve pazarda yenilikçi bir deneyimin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Dijital sistemlerin yaygınlaşması ile üretimde kalite güvencenin önem kazanması ve ambalajlar yoluyla nihai tüketiciye çeşitli bilgileri ileterek, bu sayede güven vererek tüketici ve üretici arasında bağ kurulması için fırsat yaratmaktadır.

Gıdaya yönelik akıllı ambalaj sistemleri zamanlayıcılar, termometreler ve gaz dedektörleri gibi birçok donanım bileşeni ve sensör içerir (Kuswandi ve ark., 2011). Örneğin, karvakrol aktif bileşenini içeren kolorimetrik göstergeler (Hao ve ark., 2024) ve DNA'ya göre özelleşmiş dizilimlerin kullanıldığı biyosensörler (Wu ve ark., 2024) akıllı ambalaj sistemlerinde kullanılmıştır. Gıda ürünlerinin güvenli ve sağlıklı olmasını sağlamak için oksidanlar ve antimikrobiyal maddelerin kullanıldığı teknolojilerdeki yeniliklerin yanı sıra, gaz çıkışının gözlemlenmesi, sıcaklık kontrolü ve ayırt edici sınıflandırma gibi performans standartları da akıllı ambalaj sistemlerinde değerlendirilmektedir (Akram ve ark., 2023).

Literatürdeki çalışmalarında akıllı ambalaj sistemler veri taşıyıcılar, göstergeler ve sensörler olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmektedir. Veri taşıyıcılar; barkodlar, RFID sistemler, QR etiketler ve NFC sistemlerini kapsamaktadır.(Coskun ve ark.,2013)Göstergeler zaman-sıcaklık, gaz veya tazelik indikatörlerini içermektedir. Sensörler ise biyosensörler, kimyasal sensörler ve nano sensörler olarak gruplandırılabilir.

Veri Taşıyıcılar

Veri taşıyıcı ambalajlar, akıllı ambalajlama sistemleri içerisinde kullanım şekli ve teknolojisi diğerlerinden farklı çalışan ve tasarlanan ambalajlardır. Bu ambalaj sistemi ürünlerin izlenebilirliğini ve güvenliğini artırarak tedarik zincirinde önemli bir rol oynamaktadır. Veri taşıyıcı ambalajların yaklaşımı ürünlere yönelik takip ve süreç yönetimini gerçekleştirmek olduğu için; RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama), NFC (Yakın Alan İletişimi) ve QR (Hızlı yanıt) kod gibi teknolojiler öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler, ürün hakkında detaylı bilgilere anlık olarak erişim imkânı sağlamak ve tedarik zinciri boyunca lokasyon, ulaşım süresi gibi bilgileri sunarak tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği sağlamaktadır. (Wang ve ark., 2019).

Radyo Frekansı (RFID) ile Tanımlama Teknolojisi

Veri taşıyıcı ambalaj sistemleri içinde Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisi, tedarik zinciri yönetimi, envanter kontrolü ve stok yönetimi açısından çağ atlatan bir araç olarak nitelendirilmektedir (Gao ve ark., 2020). RFID ambalajlar, etiket olarak da ifade edilebilmektedir. RFID etiketleri bulunan ambalajlar aracılığıyla ürünlerin ilk üretim basamağından nihai tüketiciye ulaşmaya kadar her aşamasının takip edilmesi mümkün kılar ve tüm verileri kaydederek ürünlere müdahaleyi kolaylaştırır (Ahvenniemi, 2020). İzleme ve veri kaydı süreci herhangi bir aksaklığın yaşanması durumunda zincirdeki ürünlerin toplanması, dağıtımın durdurulması gibi durumlarda hızlı ve etkili bir şekilde aksiyon alınmasını sağlamaktadır. Ayrıca stok yönetiminin kritik süreçlerinin optimize edilmesine, operasyonel süreçlerin kolaylaştırılmasına ve planlama yapılmasına katkıda bulunmaktadır (Pavlić ve ark., 2020). Ayrıca özellikle gıda ve ilaç sektörlerinde ürün sahteciliği, yanlış etiket ve bilgilendirme risklerini azaltmaktadır (Gao ve ark., 2020; Kuswandhi ve ark., 2012).

Bu teknoloji, ürünlerin her bir aktarım basamağının takip edilmesini mümkün kılarak, tedarik zincirindeki akışın kesintisiz bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır (Kang ve Lee, 2015). RFID teknolojisi sayesinde karmaşık lojistik operasyonları gerektiren sektörlerde sevkiyat operasyonlarının hizmet kalitesi artırılabilir.

RFID teknolojisi kullanılarak tüketici güvenliği sağlanabilmektedir. Çünkü ürünlerde herhangi bir problem çıkması durumunda piyasadan hızlıca toplatılmasını sağlayacak veri setlerine erişmek mümkün olabilmektedir.

RFID teknolojisi içeren ambalajlar tüketici deneyim ve tercihlerini de çeşitlendirebilmektedir. Satın aldıkları ürün hakkında daha fazla bilgiye sahip olmaları, ürünün tüm işlem basamaklarına ilişkin süreç izlemesi yapabilmeleri tüketicilerin yönelimleri üzerinde etkili olabilmektedir. Tercih edilme nedeni ve ürün kullanımı için cazibeyi arttıran yanı sıra, ürünün üretildiği süreçlere hâkim olmak tüketicinin marka sadakati ve tüketici güvenini artırma potansiyeline sahip olmasıdır (Want, 2006). Ayrıca, bu sistemler sayesinde tüketicilerin çevresel etkiler konusunda örneğin karbon ayak izi, su ayak izi gibi detayları fark etmelerine ve daha bilinçli tüketim kararları almalarına teşvikte bulunabilmektedir. Sürdürülebilirlik açısından da geri dönüşüm süreçlerini optimize ederek, hangi ürünlerin yeniden kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir olduğunu tayin etmede yardımcı olmaktadır (Engels ve ark., 2000).

QR Etiketler ve NFC Sistemleri

Akıllı ambalaj uygulamalarında ürün güvenliği, izleme süreçleri ve tüketicinin bilgilendirilmesindeki diğer bir uygulama QR etiket ve NFC sistemleridir. Bu sistemler dünya üzerinde telekomünikasyon ve çeşitli endüstriyel sektörlerde stok yönetimi ve ürün takibine yönelik olarak kullanılmaktadır. NFC ve QR kod

teknolojileri Android, IOS sistemleri aracılığı ile ürün hakkındaki kayıtlı olan tüm bilgilere (besin değerleri, alerjenler, menşei bilgisi, kullanım talimatları vb.) erişimi sağlayabilmektedir (Chen ve ark., 2020) Ayrıca, bu tür ambalajlar çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, lojistik süreçleri kolaylaştırması, operasyonel süreçlere ilişkin riskleri ortadan kaldırması, geri dönüşüm süreçlerinde malzemelerin ayrıştırılmasını kolaylaştırabilir ve katı atık yönetimini iyileştirebilir (Mihindulukulasuriya ve Lim , 2019).

Pavithra ve Saranya (2020) QR kodlarının gıda ürünlerinde kullanılarak ürün menşei, içerik bilgisi, besin değerleri ve saklama koşulları gibi bilgilerin anında sunulabileceğini belirtmektedir. Ancak bu teknoloji basılabilir etiketlerin içerdiği bilgileri içeriyor olmasının yanı sıra, bilgi depolama hacmi itibariyle ürünlere yönelik farkındalık artırıcı bilgiler, üretim teknolojileri ve gıdanın yolculuğuna ilişkin çok daha fazla sayıda bilginin paylaşılmasına da olanak sağlamaktadır. Bu nedenle gıda güvenliği, pazarlama ve üretim stratejileri konusunda ambalajın ötesinde bir imkân alanı oluşturmaktadır.

QR ve NFC teknolojilerinin gıda sektöründeki kullanımı, akıllı ambalajlama veri taşıyıcı sistemlerinde olduğu gibi tedarik zinciri boyunca izlenebilirlik ve şeffaflık sunarak, ürünlerin raf ömrünü optimize etmeye yardımcı olmaktadır. Rizou ve ark. (2020) bu ambalajlama sistemlerinin özellikle soğuk zincir yönetiminde büyük katkı sağladığını belirtmektedir. Örneğin sıcaklık değişimlerinin anlık olarak izlenmesini sağlayacak sistemler eşliğinde kullanılması durumunda, soğuk zincirde taşınması gerekli gıdalara ilişkin bilgiyi kayıt altına alarak ürünlerin uygun koşullarda taşınması ve depolanmasını sağlamakta, böylelikle herhangi bir aksaklığın tespit edilmesine olanak sağlayarak gıda güvenliğini arttırmaktadır. Bu tür teknolojiler tüketici memnuniyetini artırmakta ve bilinçli tüketim alışkanlıklarını desteklemektedir (Bong ve ark., 2018).

Yakın Alan İletişimi (NFC), RFID teknolojisinden türetilmiş ve birkaç santimetre mesafede kablosuz bağlantı sağlayan teknoloji tabanlı bir ambalajlama yöntemidir. Bu teknoloji, iki cihaz arasında veri alışverişini mümkün hale getirerek ürünlerle ilgili hızlı ve yakın mesafede bilgi erişiminin sağlanmasına olanak tanır. NFC'nin RFID'den en belirgin farkı ise akıllı telefonlar, tabletler ve dizüstü bilgisayarlar gibi mobil cihazlara entegre edilmesinden dolayı çeşitli teknolojik araçlarla geniş bir kullanım alanında bilgi erişimine imkan sağlamasıdır. Ayrıca, NFC'nin kısa mesafeli çalışması, cihazlar arasında veri paylaşımının yalnızca kullanıcıların açık onayıyla gerçekleşmesini sağlar. Örneğin, bu özellik ödeme işlemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Pigini ve Conti., 2017). NFC, QR koduna kıyasla tüketicilere daha hızlı ve pratik bir kullanım imkanı sunar. QR kodlarında, tarayıcı uygulamasını açmak, kodu uygun koşullarda çerçevelemek, kodu okumak ve ardından tarayıcının yönlendirdiği URL'yi onaylamak gibi birden fazla adım gerekir. NFC'de ise yalnızca NFC teknoloji özellikli bir cihazın (akıllı telefon, tablet vb.) ilgili nesneye

yaklaştırılması yeterlidir. Bu işlem, etiketteki tüm verileri okuyan uygulamanın otomatik olarak başlatılmasını sağlar (Pigini ve Conti., 2017). Bu sayede tüketiciler ürünlerin sisteme yüklenmiş olan tüm bilgilerine erişebilir. Örneğin; ürün içeriği, ürünün tüketim talimatı, taşıma ve saklanma koşulları gibi tüm bilgilere erişebilir.

Göstergeler

Akıllı ambalajlama teknolojileri içerisinde göstergeler ürünlerin tazelik, sıcaklık, nem seviyesi veya herhangi bir çevresel etmenden dolayı ürün ambalajının fiziksel deformasyona uğrayıp uğramadığı konusunda bilgi vermektedir. Sağladıkları bilgiler görsel değişiklikler; örneğin farklı renk yoğunlukları veya ambalajdaki boyanın yayılıp yayılmaması konusunda gözle görülebilir sinyaller verilerek niteliksel veya yarı niceliksel bilgi sağlamaktadır (Drago ve ark., 2020).

Göstergeler genellikle tutarlı bir akıllı paketleme sınıfını temsil etmektedir. Göstergeler içindeki alt bileşenlerde en çok kullanılanları, kontrol edilmesi istenilen parametreye bağlı olmakla birlikte; zaman-sıcaklık göstergeleri, tazelik göstergeleri ve gaz göstergeleridir (Kalpana ve ark., 2023).

Zaman-Sıcaklık Göstergeleri

Sıcaklık, belirli gıda ürünlerinin raf ömürlerinin belirlenmesinde takip edilmesi gereken temel parametrelerden biridir. Bozulabilir gıda endüstrisinin temel zorluklarından biri, gıdayı istenmeyen sıcaklık farklılıklarına karşı koruyarak ürünün tüketiminin sağlıklı olduğunu garanti altına almaktır. Soğutulmuş ve dondurulmuş ürünler için önemli ve sağlanması ilave çaba gerektiren bir zorluktur Kuswandi ve ark., 2020). Meyve ve sebze gibi hızlı bozulabilir gıdaların kalitesini ve güvenliğini korumak için tüm tedarik zinciri boyunca sıcaklığın, gıdaya uygun seviyede şartlandırılması ve izlenmesi gerekmektedir. Yanlış sıcaklık değerleri veya kontrol edilmeyen sıcaklık faktörü, gıdanın tüketim maddesi halinden çıkmasına ve israfına neden olmaktadır. Yapılan bir araştırmaya göre hızlı bozulabilir gıda lojistiğinde kötü yönetilen sıcaklığın %35'e kadar ürün kaybına neden olabileceğini belirtilmektedir (Göransson ve Nilsson, 2018). Gıdanın uygun sıcaklık ortamında iletim zincirinde yer alıp almadığını görebilmek için zaman-sıcaklık göstergeleri (Time-Temperature Indicator, TTI) önemli bir ambalajlama desteğidir.

TTI uygulama sürecinin bir parçası olarak, gıda kalitesi ve reaksiyon kaybına yönelik kinetik çalışmaların yapılması gerekmektedir. Enzimlere, polimerlere ve biyolojik mekanizmalara dayalı olarak her bir faktör için çeşitli TTI sınıfları geliştirilmiş ve test edilmiştir. TTI gıdanın yer depolama alanlarından, taşıma zincirlerine kadar olan tüm küçük ya da büyük lojistik zincirlerde uygulanabilmektedir. Gıdanın istenmeyen sıcaklık aralıklarına maruz kalması durumunda, gıdayı tüketilemez hale gelen biyokimyasal-kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir (Giannakourou ve Toukis, 2003; Mirza Alizadeh ve ark., 2021; Nastasijevic ve ark., 2017).

Sıcaklık-zaman göstergeleri, literatürde farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Örneğin, Giannakourou ve Taoukis (2002)'nin TTI'ları kimyasal, fiziksel ve biyokimyasal reaksiyon temelli değerlendirdiği, Son ve ark. (2014) ise çalışma prensiplerini dikkate alarak enzimatik reaksiyonlar doğrultusunda değerlendirdiği görülmektedir. Bunların yanı sıra Tsironi ve arkadaşları (2008) TTI'ların tedarik zinciri yönetimini dikkate alarak teknolojik temelli olarak değerlendirmiştir. Bu sınıflandırma ve değerlendirmeler dikkate alındığında TTI'ların uygulama alanlarına göre çeşitlenebileceğini göstermektedir. En yaygın şekilde görüleni ise iki kategoride gruplandırmış olmalarıdır. Kısmi veya tam geçmiş göstergeleri olarak adlandırılan bu göstergelerden kısmi geçmiş göstergesi, önceden belirlenmiş belirli bir eşik sıcaklığı aşılmadıkça reaksiyon vermemekte ve bu nedenle, kötü sıcaklık koşullarını tanımlayarak tüketicileri, örneğin dondurma veya buz çözme sırasında, mikroorganizmaların potansiyel olarak hayatta kalması ve protein denatürasyonu konularında bilgilendirmektedir. Tam geçmiş göstergesi ise, ürünün ilk basamağından itibaren ömrüne ilişkin bir ölçüm sağlamak amacıyla tüm gıda tedarik zinciri boyunca bütün sıcaklık aralıklarına ve sürelerine yönelik sürekli olarak karşılık vermektedir. Bu tür göstergeler, mikroorganizma, spor veya enzimlerin biyolojik aktivitesindeki değişime karşı duyarlıdır. (Dobrucka ve Cierpiszewski, 2014; Kuswandi ve ark., 2011).

Tazelik Göstergeleri

Mikrobiyal kontaminasyon ve besin maddelerinin oksidasyonu, gıda ürünlerinin güvenliğini etkileyen ve insan sağlığını tehdit eden gıda bozulmalarının iki ana nedenidir (Sun ve ark., 2022). Her ürünün kendisine özgü tolere edebileceği en düşük O₂ ve en yüksek CO₂ konsantrasyon değerleri mevcuttur. Depolama ortamlarında bulunan O₂ veya CO₂ miktarlarının tolerans sınırlarının altında veya üzerinde olmaları durumunda ürün fizyolojik olarak bozulmaktadır (Karagöz ve Demiröven, 2018). CO₂'nin yanı sıra bozulma sonucunda, topluca TVB-N (Toplam uçucu bazik nitrojen) olarak bilinen uçucu bileşikler trimetilamin (TMA), dimetilamin (DMA) ve amonyak gibi diğer metabolitler; histamin, putresin, tiramin ve kadaverin gibi biyojen aminler; etanol; sülfürik bileşikler; ve organik asitler tazelik göstergeleri için uygun hedef moleküller olarak incelenmiştir (Hogan ve Kerry, 2008). Tazelik göstergeleri, gıdanın bozulma sürecini, fermentasyon derecesini veya olgunlaşma aşamasını tespit etmek ve herhangi bir algı düzeyindeki tüketiciye ambalajdaki renk değişiklikleri yoluyla ürünün tazeliği konusunda bilgi vermek amacıyla geliştirilmiş akıllı ambalaj göstergelerindedir. Üründe meydana gelen kimyasal değişiklikler veya mikrobiyal farklılaşmadan kaynaklı değişimler, ambalajlanmış ürüne yönelik gıda kalitesiyle ilgili tüketiciye doğrudan bilgi sağlamaktadır. Tazelik göstergesi, mikrobiyal büyüme sonucunda ambalajın içinde açığa çıkan metabolitlerle reaksiyona girebilmektedir (Rukchon ve ark., 2014). Bu nedenle genellikle ürünün maruz kaldığı gazlar, nem

ve/veya sıcaklık değişimlerine göre renk değiştiren veya renklerle belirli desenler oluşturan özel mürekkepler veya etiketlerden üretilmektedir. Böylece, ürünün tazeliğini görsel olarak temsil ederek tüketicilere, güvenli tüketilebilecek zaman dilimi konusunda net bir bilgi sağlamaktadır. Örneğin; karideste pembeden açık griye ve son olarak grimsi yeşile doğru renk değişimi gösteren film üretilmiştir. Film oluşturucu olarak patates nişastası, pH değişimine duyarlılığı nedeniyle yaban mersini antosiyaninleri ve filmin yapısını güçlendirici olarak kondroitin sülfat kullanılarak karidesin tazeliği 4°C'te izlenebilmiştir (Sun ve ark.,2022). Antosiyaninler suda çözünen pH değişimine duyarlı yenilebilir doğal pigment olarak tanımlanmıştır. Doğada yaban mersini, siyah havuç ve dut gibi meyvelerde doğal olarak bulunmaktadır. Bu nedenle pek çok çalışmada gıdaların tazeliğinin izlenmesinde biyolojik bazlı

pH'ya duyarlı doğal boyalar olarak kullanılmaktadır. Antosiyaninlerin renk stabilizasyonunu sağlamak zor olsa bile kondroitin sülfat gibi negatif oksidasyona sahip asidik mukopolisakkaritlerle birlikte kullanıldığında supramoleküler polimerler oluşturabilir (Bao ve ark., 2022). CO₂'nin yanı sıra, topluca TVB-N(Toplam uçucu bazik nitrojen) olarak bilinen uçucu bileşikler trimetilamin (TMA), dimetilamin (DMA) ve amonyak gibi diğer metabolitler; histamin, putresin, tiramin ve kadaverin gibi biyojen aminler; etanol; sülfürik bileşikler; ve organik asitler bu pH algılama göstergeleri için uygun hedef moleküller olarak incelenmiştir (Hogan ve Kerry, 2008).

Gaz Göstergeleri

Gıdalar buldukları ortam koşullarından doğrudan etkilendiklerinden ambalaj türü, saklama koşulları ve ambalajların içindeki gaz bileşimi gıdanın raf ömründe önemli etkenlerdir. Gıda ve ambalaj içindeki gaz bileşiminde meydana gelen değişiklikler, ambalajların içinde biriken gazların dikkate alınması ile bir takip sisteminin oluşturulması mümkündür. Yapılan literatür araştırmalarında akıllı ambalaj sistemlerine ilişkin olarak dikkate alınan gaz göstergelerinin sadece gaz bileşimindeki değişiklikleri izlemekle kalmadığı, aynı zamanda aktif ambalaj bileşenlerinin, örneğin oksijen ve karbondioksit tutucuların etkinliğini değerlendirmek için de kullanıldığını ifade etmektedir (Drago ve ark., 2020).

Ambalajda bir sızıntı olup olmadığını tespit etmek ve dolayısıyla ambalajın bütünlüğünü sağlamak amacıyla da gaz göstergeleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu uygulamalar, özellikle gıdaların değiştirilmiş atmosfer ambalajı (Modified Atmosphere Packaging, MAP) ile saklandığı durumlarda önem taşımaktadır (Lamba ve Garg, 2019). MAP, gıdaların tazeliğini korumak, raf ömrünü uzatmak ve mikrobiyal bozulmayı engellemek için kullanılan bir yöntemdir (Lamba ve Garg, 2019). Bu yöntemde, ambalajın içindeki hava, gıdanın bozulmasını yavaşlatacak şekilde belirli bir gaz karışımı ile değiştirilmektedir. Oksijen seviyesi genellikle düşürülürken, karbondioksit ve azot gibi gazlar arttırılmaktadır. Bu gaz karışımının

belirli oranlarda tutulması, gıdanın tazeliğini ve kalitesini korumak açısından önem taşımaktadır (Vu ve Won, 2013).

Gaz göstergeleri, ambalajın içindeki karışımın belirlenen oranlarda kalıp kalmadığını izlemek için kullanılabilir. Örneğin, oksijen seviyesinin yükselmesi, ambalajda bir sızıntı olduğunu veya ambalajın yeterince etkin bir şekilde gaz geçirmez olmadığını gösterebilir (Drago ve ark., 2020). Bu durumda, gaz göstergeleri ambalajın içindeki gaz bileşimini sürekli izleyerek, herhangi bir değişiklik durumunda uyarı vererek hem üreticiye hem de tüketiciye ambalajın bütünlüğü hakkında bilgi sağlamaktadır (Drago ve ark., 2020).

Özetle, gıdanın özellikleri, ambalaj materyalinin türü ve çevresel koşullar, ambalajın içindeki gaz bileşiminin değişmesine neden olabilmektedir. Gaz göstergeleri, bu değişiklikleri izleyerek, aktif ambalaj bileşenlerinin etkinliğini değerlendirmek, ambalajdaki sızıntıları tespit etmek ve ambalaj bütünlüğünü sağlamak için kullanılmaktadır. Bu göstergeler, özellikle değiştirilmiş atmosfer ambalajı kullanılan gıdaların saklanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

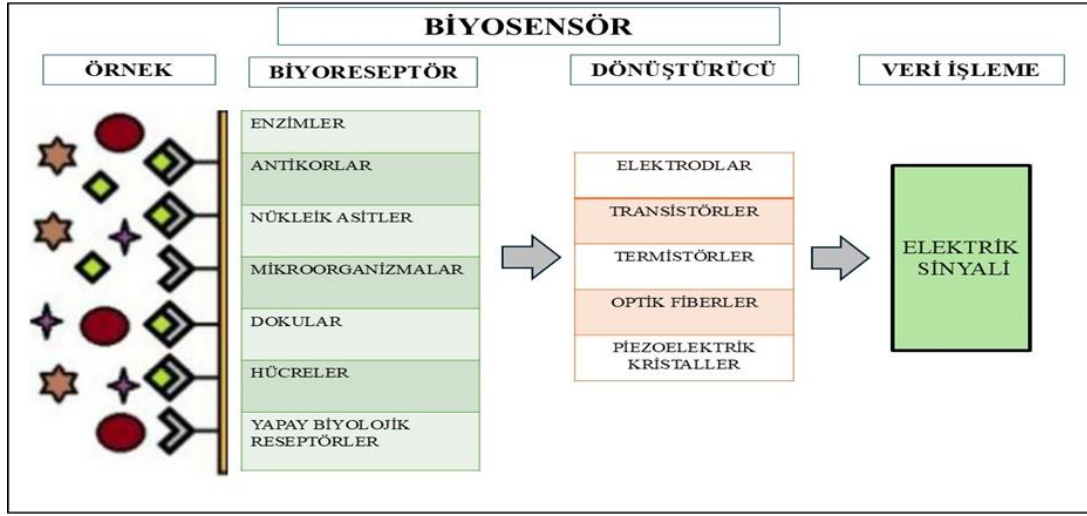
Sensörler

“Sensör” terimi, enerjiyi veya maddeyi tanıyan, yönlendiren veya ölçen cihazları ifade eder. Geçmişte kuvvet, ivme, akış ve basınç gibi fiziksel büyüklükleri ölçen sensörlerin yerini günümüzde mikrogravimetrik, termometrik, manyetik veya optik reseptörlere sahip olan sensörler almıştır. Bu cihazlar fiziksel ve kimyasal bir özelliğin tanımlanmasına veya değerlendirilmesine göre çalışmaktadır. Bir sinyalin reseptörlerden alınıp fizikokimyasal dönüştürücüler yardımıyla izlenebilir hale getirilmesini sağlamaktadır (Chen ve ark., 2020).

Gıdaların bozulması öncelikle gıda içindeki protein, karbonhidrat ve yağların mikrobiyal aktivite sebebiyle parçalanmasıyla başlamaktadır (Sun ve ark., 2022). Mikrobiyal aktivite artışı pH değerinde değişikliklere neden olmakta ve toksik madde, kötü koku ve gaz oluşumuna yol açabilmektedir (Chen ve ark., 2020). Akıllı paketlenen sistemlerinden sensörler; fiziksel, kimyasal ve biyolojik verileri ileri teknolojilerle birleştirip gıdadaki mikrobiyal aktivite değişimleriyle ilgili gerçek zamanlı izleme sağlamaktadır.

Biyosensörler

Biyosensörler, biyolojik analitler yardımıyla üründe kullanılarak gıdadaki herhangi bir parametrenin izlenmesi veya tespit edilmesi için kullanılan sensörlerdir. Şekil 3'te biyosensörlerin çalışma mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3. Biyosensörlerin genel çalışma mekanizması

Biyoreseptör bir analitin tanınmasında kullanılan biyosensörün biyolojik hassasiyete sahip kısmıdır. Bu reseptörler tek bir partiküler substratı bağlayacak ve diğer substratlara bağlanmayacak özelliktedir. Temel olarak biyoreseptörler 3 grup altında toplanmaktadır. Bunlar; biyokatalitik, biyoafinite ve hibrit reseptörleridir. Biyokatalitik reseptörler, analiti belirlenmeyen formdan belirlenebilir forma dönüştürerek transdüserle kaydedilebilir ve belirlenebilir hale getirmektedir (Mehrvar ve ark., 2000). Biyoafinite reseptörler belirli bir ligantı termodinamik olarak stabil kompleks formuna dönüştüren seçici etkileşimler oluşturmaktadır (Mello ve Kubota, 2002). Hibrit reseptörlerde ise genellikle nükleik asit kullanılmaktadır. Bu reseptörler, DNA'da meydana gelen değişimleri kimyasal olarak belirlemekte veya DNA'nın türe özgü diziliminin hibridizasyonu ile mikroorganizmaları belirlemektedir (Mehrvar ve ark., 2000). Gıda kimlik doğrulamasında ve taşıma tespitinde DNA dizilimi, izotop analizi ve spektroskopi gibi teknolojilerden yararlanılmaktadır (Wu ve ark., 2024). Dolayısıyla biyosensörlerden gıdalarda taklit ve taşıma alanındaki uygulamalarda da yararlanılmaktadır. Kutu içeceklerdeki glikoz miktarının tespiti için glikoz oksidaz enzimi içeren naylon-6 nanofiber membranların kullanılması izlenebilirlik açısından biyosensör kullanımına bir örnektir (Scampicchio ve ark., 2010). Ayrıca, biyosensörler gıdalarda antibiyotik, toksin, pestisit kalıntısı, bakteri, toksin, glikoz, biyojen aminler, vitaminler ve çeşitli katkı maddelerinin tespitinde kullanılmaktadır (Mello ve Kubota, 2002). Gıdalarda kompozisyon belirleme, işlenmiş ve çiğ gıdalarda kontaminasyonu belirleme, fermentasyon prosesinin kontrol aşamalarında da kullanılabilir.

Biyosensörlerden olan optik sensörler uzaktan kontrol edilebilen kızılötesi veya ultraviyole ışık kullanan sensörlerin gelişimiyle ortaya çıkarılan yeni bir teknolojidir. Işığın belirli dalga boyları atmosferik gazlar tarafından emilirken, diğerlerinin geçmesine izin verilir. Emilen ışık miktarına bağlı olarak optik dedektör ışık miktarını

algılar ve bunu ölçülebilir bir elektrik çıkışına dönüştürür (Yebo ve ark., 2012). Örneğin; O2xyDot® hem ambalajın üst boşluğunda hem de sıvı ürünlerde olduğu gibi ürünlerle temas halinde kullanılabilir. Bu sensör, ışık yayan bir diyottan (LED) gelen darbeli mavi ışıkla aydınlatıldığında mavi ışığı emen ve floresan süresine göre ambalajdaki oksijen seviyelerinin ölçülmesini sağlayan bir optik detektör tarafından algılanan kırmızı bir ışık yayan bir noktadan oluşur. Oksijenin varlığı boyanın floresansını söndürür. Aslında, enerji bir çarpışma sırasında uyarılmış floresan boyadan oksijen molekülüne aktarılır, böylece emisyon yoğunluğunu ve boyanın floresan ömrünü azaltır (Drago ve ark., 2020). Bazı araştırmacılar karbondioksiti tespit etmek için Förster rezonans enerji transferi mekanizmasına dayanan ve indikatör olarak fosforesan Pt-porfirin ve naftolftalein kullanan bir katı hal polimerik optikokimyasal sensör geliştirmiştir (Kalpana ve ark., 2023). Aynı prensibe göre çalışan bu iki dedektörde çok düşük konsantrasyonlardaki O₂ veya CO₂ algılanarak ürünlerin kalitesini kontrol etmek mümkündür (Drago ve ark., 2020).

Kimyasal Sensörler

Kimyasal sensörler, özel olarak tasarlanmış etkileşimlere ve sinyal iletim mekanizmalarına dayalı olarak gıda güvenliği denetiminde yüksek verimle kullanılmaktadır (Chen ve Li, 2023). RFID etiketleri ile entegre edilirse paketlemede kolaylık sağlayacağından ve bilgi verme ve geçmiş bilgilere erişim gibi avantajları olacağından daha çok tercih edilir olacağı düşünülmektedir (Şahin ve Konuk, 2019). Örneğin; polidiasetilen ve Lawson reaktifi kullanılarak elde edilen kimyasal sensör etilen tespitinde kullanılmaktadır (Drago ve ark., 2020). Kimyasal sensörler, gıda kalitesinin ve ambalaj bütünlüğünün izlenmesinde daha yaygın görülmektedir (Chen ve Li, 2023).

Kimyasal sensörlerde, yüzey adsorpsiyonu sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sayede bir bileşiğin ortamda bulunup bulunmadığı veya konsantrasyonu tespit edilebilmektedir (Inamuddin ve ark., 2023). Kimyasal reseptörler, bozulma sonucu oluşan uçucu organik bileşikler ve bozulma sonucu oluşan gazları çok düşük konsantrasyonlarda bile tespit edebilmektedir. Bu sensörler gaz kromatografisi ve kütle spektrometresi gibi analiz yöntemlerinin yerine gerçek zamanlı ölçümlerle bilgi sağlamaktadır (Kalpana ve ark., 2023). Kullanılan kimyasal sensörlerin çoğu elektrokimyasal veya optik sinyal iletimini sağlayan gaz sensörleridir.

Nanosensörler

Son yıllarda, çok sayıda çalışma nanosensör uygulamalarına odaklanmıştır. Son yıllarda nanoliflerden; esnek, hızlı tepki veren, düşük güç isteyen elektrokimyasal sensörler üretilmektedir. Bu sensörler bozulma sonucu oluşan amonyumu tespit edebilmekte ve akıllı telefonlar aracılığıyla okunabilir hale getirmektedir (Preethichandra ve ark., 2022). Pestisit kalıntılarının tespitinde her ne kadar biyosensör

kullanımı yaygın olsa da yeni biyoteknolojik elektrokimyasal membranlar barbunya, salatalık ve fasulye gibi sebze örneklerinde triklorfon ve asetamiprid gibi kalıntıların hızlı şekilde tespiti gerçekleştirilmiştir (He ve ark., 2023). Bir çalışmada, çinko oksit, kil ve gümüş kullanılarak karbon nanotüpleri üretilmiş ve bu nanotüplerin titanyum dioksit ve bakır oksit içine gömülerek gıda ambalajının bariyer özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir (Pereira ve ark., 2023). Farklı bir çalışmada da, polistiren ürünlere göre daha çevre dostu olan nanoselüloz, bitkilerden üretilerek ambalaj malzemesi olarak kullanılmış ve psödoplastik özellik gösterdiği ve antioksidan ajanları iyi taşıdığı belirlenmiştir (Pereira ve ark., 2023). Nano malzemelerin sensörlere entegre edilmesi, tedarik zinciri boyunca gıda kalitesinin izlenmesinde ve ambalaj malzemelerinde önemli rol oynamaktadır ve günümüzde hala gelişen bir teknolojidir.

SONUÇ

Bu derlemede, akıllı ambalaj sistemlerinin fonksiyonel özelliklerine göre ve bu sistemlerde kullanılan materyallere göre sınıflandırması yapılmıştır. Güncel literatürde bulunan örnekler incelenmiştir. Akıllı ambalaj sistemleri içinde yer alan, aktif ve akıllı ambalajların farkı açıklanmış ve kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Günümüzde kullanılan ambalaj teknolojisinin ürünün etiket bilgilerini taşıması ve gıdanın izlenebilirliğiyle ilgili bilgi sağlaması istenmektedir. Bunun yanı sıra, gıdanın raf ömrü ve fonksiyonel bileşenlerin ömrünü uzatması da gelişen teknoloji içinde ambalaj sektörünün odağı haline gelmiştir. Bu nedenle, gıda ambalajlarında gıdanın türü ve fonksiyonelliğine göre farklı beklentiler olmaktadır.

Akıllı ambalaj sistemleri, hassas ölçüm sağlamakla birlikte ekonomik açıdan hala maliyetli olabilmektedir. Bu durum, ambalaj sektörünün hala hem bilimsel hem endüstriyel alanda gelişmekte olduğunu bir göstergesidir.

KAYNAKLAR

Ahmed I, Lin H, Zou L, Brody AL, Li Z, Qazi IM, Pavase TR, Lv L., 2017. A comprehensive review on the application of active packaging technologies to muscle foods. *Food Control*, 82: 163–178. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.06.009>

Ahvenniemi H., 2020. The role of RFID in enhancing supply chain traceability. *Journal of Supply Chain Management*, 56(3): 45-58.

Akram N, Rashid KT, Munawar T, Usman M, Anjum F., 2023. Challenges and perspectives in application of smart packaging. *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science, Methods for Producing Smart Packaging 2023*: 25-37. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95644-4.00017-6>

Alizadeh Sani M, Khezerlou A, Tavassoli M, Abedini AH, McClements DJ., 2024. Development of sustainable UV-screening food packaging materials: A review of recent advances. *Trends in Food Science and Technology*, 145: 104366.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104366>

Aragüez L, Colombo A, Borneo R, Aguirre A., 2020. Active packaging from triticale flour films for prolonging storage life of cherry tomato. *Food Packaging and Shelf Life*, 25: 100520. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100520>

Bao Y, Cui H, Tian J, Ding Y, Tian Q, Zhang W, Wang M, Zang Z, Sun X, Li D, Si X, Li B., 2022. Novel pH sensitivity and colorimetry-enhanced anthocyanin indicator films by chondroitin sulfate co-pigmentation for shrimp freshness monitoring. *Food Control*, 131: 108441. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108441>

Bong WK, Shankar K, Pasha MFK., 2018. The use of NFC and QR code in consumer mobile phones for authentication. *Journal of Food Quality*, 2018: 1-8.

<https://doi.org/10.1155/2018/4130295>

Bonilla J, Talón E, Atarés L, Vargas M, Chiralt A., 2013. Effect of the incorporation of antioxidants on physicochemical and antioxidant properties of wheat starch-chitosan films. *Journal of Food Engineering*, 118(3): 271–278.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.008>

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. Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15046>

Chen X, Yao C, Li Z., 2023. Microarray-based chemical sensors and biosensors: Fundamentals and food safety applications. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 158: 116785. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116785>

Chen X, Zhang Y, Liu H., 2020. NFC technology and consumer engagement in smart packaging. *Journal of Consumer Marketing*, 37(6): 707-719.

Choi I, Lee JY, Lacroix M, Han J., 2017. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato. *Food Chemistry*, 218: 122-128.

Coskun V, Ozdenizci B, Ok K., 2013. A survey on Near Field Communication (NFC) Technology. *Wireless Personal Communications*, 71(3): 2259-2294.

<https://doi.org/10.1007/s11277-012-0935-5>

Dobrucka R, Cierpiszewski R., 2014. Active and intelligent packaging food—Research and development—A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 64: 7–15.

Drago E, Campardelli R, Pettinato M, Perego P., 2020. Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11): 1628.

<https://doi.org/10.3390/foods9111628>

Engels DW, Sarma SE, Putta L, Brock DL., 2000. The networked physical world: IADIS International Conference, January 2002, p: 104-111, WWW/Internet.

Gaikwad KK, Singh S, Negi YS., 2019. Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce. *Environmental Chemistry Letters*, 18: 269–284.

<https://doi.org/10.1007/s10311-019-00938-1>

Gao T, Tian Y, Zhu Z, Sun DW., 2020. Modelling, responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality. *Trends in Food Science and Technology*, 99: 311-322.

Giannakourou M, Taoukis P., 2002. Systematic application of time temperature integrators as tools for control of frozen vegetable quality. *Journal of Food Science*, 67(6): 2221–2228.

Giannakourou M, Taoukis P., 2003. Application of a TTI-based distribution management system for quality optimization of frozen vegetables at the consumer end. *Journal of Food Science*, 68(1): 201–209.

Goodarzi M, Moradi M, Tajik H, Forough M, Ezati P, Kuswandi B., 2020. Development of an easy-to-use colorimetric pH label with starch and carrot anthocyanins for milk shelf life assessment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153: 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.014>

Göransson M, Nilsson F., 2018. Temperature performance and food shelf-life accuracy in cold food supply chains—Insights from multiple field studies. *Food Control*, 86: 332–341.

Hao H, Duan B, Zhang L, Wang L, Zhang L, Wang Y, Li Y, Zhao C, Jia G, Li Y, Liu C, Lu K., 2024. Fabrication and characterization of polyvinyl alcohol/sodium alginate loaded carvacrol/silica hollow microspheres composite hydrogel as a colourimetric freshness indicator. *Food Bioscience*, 57: 103474.

<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103474>

He X, Pu Y, Chen L, Jiang H, Xu Y, Cao J, Jiang W., 2023. A comprehensive review of intelligent packaging for fruits and vegetables: Target responders, classification, applications, and future challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(2): 842–881. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13093>

Hogan SA, Kerry JP., 2008. Smart packaging of meat and poultry products. In J. Kerry & P. Butler (Eds.), *Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods* (pp. 33-54). John Wiley & Sons: West Sussex, England.

Holcapkova P, Hurajova A, Bazant P, Pummerova M, Sedlarik V., 2018. Thermal stability of bacteriocin nisin in polylactide-based films. *Polymer Degradation and Stability*, 158: 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.10.019>

Inamuddin, Altalhi T, Cruz JN., 2023. Methods for Producing Smart Packaging. In Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science. 262 pp. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/C2021-0-03315-0>

Irimia A, Grigoraş VC, Popescu CM., 2024. Active cellulose-based food packaging and its use on foodstuff. *Polymers*, 16(3): 389. <https://doi.org/10.3390/polym16030389>

Kalpana S, Priyadarshini SR, Maria Leena M, Moses JA, Anandharamakrishnan C., 2023. Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 93: 145–157.

Kang YS, Lee HJ., 2015. Development and evaluation of a RFID-based traceability system for cattle breeding in Korea. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 28(11): 1660-1665. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0116>

Karagöz Ş, Demirdöven A, 2017. Gıda ambalajlamada güncel uygulamalar: Modifiye atmosfer, aktif, akıllı ve nanoteknolojik ambalajlama uygulamaları. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6 (1): 9-21

Khan H, Raghuvanshi S, Saroha V, Singh S, Baba WN, Mudgil P, Dutt D., 2023. Biotransformation of banana peel waste into bacterial nanocellulose and its modification for active antimicrobial packaging using polyvinyl alcohol with in-situ generated silver nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life*, 38:101115. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101115>

Kumar S, Boro JC, Ray D, Mukherjee A, Dutta J., 2019. Bionanocomposite films of agar incorporated with ZnO nanoparticles as an active packaging material for shelf life extension of green grape. *Heliyon*, 5: e01867.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01867>

Kuswandi B., 2020. Active and intelligent packaging for food quality and safety. *Journal of Food Quality*, 2020: 1-18.

Kuswandi B, Wicaksono Y, Abdullah AJ, Heng LY, Ahmad M., 2011. Smart packaging: Sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5: 137–146.

Lamba A, Garg V., 2019. Recent innovations in food packaging: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition International*, 4: 123–129.

Lydekaityte J, Tambo T., 2020. Smart packaging: Definitions, models and packaging as an intermediary between digital and physical product management. *International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, 30(4): 377–410.

<https://doi.org/10.1080/09593969.2020.1724555>

Mehrvar M, Bis C, Scharer JM, Moo-Young M, Luong JH., 2000. Fiber-optic biosensors—Trends and advances. *Analytical Science*, 16: 677–692.

Mello LD, Kubota LT., 2002. Review of the use of biosensors as analytical tools in the food and drink industries. *Food Chemistry*, 77: 237-256.

Mihindukulasuriya SDF, Lim LT., 2019. Nanotechnology in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 19: 123-133.

Mirza Alizadeh A, Masoomian M, Shakooie M, Zabihzadeh Khajavi M, Farhoodi M., 2021. Trends and applications of intelligent packaging in dairy products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(2): 383–397.

Mohamed SAA, El-Sakhawy M, El-Sakhawy MAM., 2020. Polysaccharides, protein and lipid-based natural edible films in food packaging: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 238: 116178. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116178>

Mohebi E, Marquez L., 2015. Intelligent packaging in meat industry: An overview of existing solutions. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7): 3947-3964. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1588-z>

Mojaddar Langroodi A, Nematollahi A, Sayadi M., 2021. Chitosan coating incorporated with grape seed extract and *Origanum vulgare* essential oil: An active packaging for Turkey meat preservation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15: 2790–2804. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00867-0>

Murmu SB, Mishra HN., 2018. Selection of the best active modified atmosphere packaging with ethylene and moisture scavengers to maintain quality of guava during low-temperature storage. *Food Chemistry*, 253: 55–62.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.134>

Nastasijevic I, Lakicevic B, Petrovic Z., 2017. Cold chain management in meat storage, distribution, and retail: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 85: 012022. 10.1088/1755-1315/85/1/012022

Nopwinyuwong A, Trevanich S, Suppakul P., 2010. Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture dessert spoilage. *Talanta*, 81(3): 1126-1132. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.02.008>

Pavithra S, Saranya P., 2020. A review on QR code and its applications. *International Journal of Computer Applications*, 176(32): 28-32.

<https://doi.org/10.5120/ijca2020920133>

Pavlić B, Vukmirović Đ, Brlek T., 2020. Optimizing inventory management with RFID technology. *International Journal of Production Economics*, 228: 107735.

Pereira KY, Pradhan D, Rafferty A, Jaiswal AK, Jaiswal S., 2023. A comprehensive review on metal oxide-nanocellulose composites in sustainable active and intelligent food packaging. *Food Chemistry Advances*, 3: 100436 Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100436>

Perez-Gago MB, Krochta JM., 2002. Formation and properties of whey protein films and coatings. In: A Gennadios (Ed.), Protein-based films and coatings. (Boca Raton, FL, USA: CRC Press) pp. 159-180.

Pigini D, Conti M., 2017. NFC-based traceability in the food chain. Sustainability, 9(10): 1910. <https://doi.org/10.3390/su9101910>

Preethichandra DMG, Gholami MD, Izake EL, O'Mullane AP, Sonar P., 2022. Conducting polymer based ammonia and hydrogen sulfide chemical sensors and their suitability for detecting food spoilage. Advanced Materials Technologies, 8: 2200841. <https://doi.org/10.1002/admt.202200841>

Ribeiro-Santos R, Andrade M, Melo NR de, Sanches-Silva A., 2017. Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends. Trends in Food Science and Technology, 61: 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.021>

Rizou M, Galanakis IM, Aldawoud TMS, Galanakis CM., 2020. Safety of foods, food supply chain and environment within the COVID-19 pandemic. Trends in Food Science & Technology, 102: 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.008>

Romani VP, Prentice-Hernández C, Martins VG., 2017. Active and sustainable materials from rice starch, fish protein and oregano essential oil for food packaging. Industrial Crops and Products, 97: 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.026>

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.

Saroha V, Khan H, Raghuvanshi S, Dutt D., 2022. Development of polyvinyl alcohol-based antioxidant nanocomposite films with nanokaolin impregnated with polyphenols from pomegranate peel extract. Food Packaging and Shelf Life, 32: 100848. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100848>

Scampicchio M, Arecchi A, Lawrence NS, Mannino S., 2010. Nylon nanofibrous membrane for mediated glucose biosensing. Sensors and Actuators B: Chemical, 145(1): 394–397.

Silva-Pereira MC, Teixeira JA, Pereira-Júnior VA, Stefani R., 2015. Chitosan/corn starch blend films with extract from *Brassica oleraceae* (red cabbage) as a visual indicator of fish deterioration. LWT, 61(1): 258–262. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.041>

Siripatrawan U, Kaewklin P., 2018. Fabrication and characterization of chitosan-titanium dioxide nanocomposite film as ethylene scavenging and antimicrobial active food packaging. Food Hydrocolloids, 84: 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.049>

Son BH, Lee YJ, Jo HJ, Hong KW., 2014. New enzymatic time-temperature integrator (TTI) using porcine esterase for monitoring food quality. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57: 331-334.

Stoycheva T, Annanouch FE, Gràcia I, Llobet E, Blackman C, Correig X, Vallejos S., 2014. Micromachined gas sensors based on tungsten oxide nanoneedles directly integrated via aerosol assisted CVD. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 198: 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.03.040>

Sultana A, Kathuria A, Gaikwad KK., 2022. Metal–organic frameworks for active food packaging. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2): 1479–1495. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01387-z>

Sun X, Wang J, Dong M, Zhang H, Li L, Wang L., 2022. Food spoilage, bioactive food fresh-keeping films and functional edible coatings: Research status, existing problems and development trend. *Trends in Food Science & Technology*, 119: 122–132.

Şahin Nadeem H, Konuk Takma D., 2019. Gıdalarda akıllı ambalajlama teknolojisi ve güncel uygulamalar. *Gıda*, 44(1): 131–142. <https://doi.org/10.15237/gida.gd18106>

Tsironi T, Gogou E, Velliou E, Taoukis PS., 2008. Application and validation of the TTI based chill chain management system SMAS (Safety Monitoring and Assurance System) on shelf life optimization of vacuum packed chilled tuna. *International Journal of Food Microbiology*, 128: 108-115.

Upadhyay A, Agbesi P, Arafat KMY, Urdaneta F, Dey M, Basak M, Hong S, Umeileka C, Argyropoulos D., 2024. Bio-based smart packaging: Fundamentals and functions in sustainable food systems. *Trends in Food Science and Technology*, 145: 104369. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104369>

Vasuki MT, Kadirvel V, Narayana GP., 2023. Smart packaging—An overview of concepts and applications in various food industries. *Food Bioengineering* 2 (1): 25–41. <https://doi.org/10.1002/fbe2.12038>

Vu CHT, Won K., 2013. Novel water-resistant UV-activated oxygen indicator for intelligent food packaging. *Food Chemistry*, 140: 52–56

Wang L, Wu Z, Cao C., 2019. Technologies and fabrication of intelligent packaging for perishable products. *Applied Sciences*, 9(22): 4858.

Want R., 2006. An Introduction to RFID Technology. *IEEE Pervasive Computing*, 5(1): 25-33. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2006.2>

Wei H, Seidi F, Zhang T, Jin Y, Xiao H., 2021. Ethylenescavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 337: 127750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127750>

Weston M, Phan MAT, Arcot J, Chandrawati R., 2020. Anthocyanin-based sensors derived from food waste as an active use-by date indicator for milk. *Food Chemistry*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127017>

Wu X, Lou X, Zhou H, Raymond JJ, Kwang LG, Ong FYT, Springs SL, Yu H., 2024. Detection and absolute quantification biosensing tools for food authentication: CRISPR/Cas, digital CRISPR and beyond. *Trends in Food Science and Technology*, 145: 104349. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104349>

Yebo NA, Sree SP, Levrau E, Detavernier C, Hens Z, Martens JA., 2012. Selective and reversible ammonia gas detection with nanoporous film functionalized silicon photonic micro-ring resonator. *Optics Express*, 20(11): 11855–11862.