

Derleme Makale/Review Paper

Gıda sanayiinde akıllı ambalajlama ve uygulamaları

Intelligent packaging and applications in the food industry

Muhammed Yüceer^{1*} , Cengiz Caner² 

¹Gıda İşleme Bölümü, Çanakkale Teknik Bilimler MYO, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, ÇANAKKALE, TÜRKİYE

²Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, ÇANAKKALE, TÜRKİYE

(Yazar sıralamasına göre)

ORCID ID: 0000-0001-6709-1347, Doç. Dr.

ORCID ID: 0000-0002-8293-7301, Prof. Dr.

*Sorumlu yazar/Corresponding author: myuceer@comu.edu.tr ve ccaner@comu.edu.tr

Geliş Tarihi : 26.12.2022

Kabul Tarihi : 08.05.2023

Öz

Amaç: Gıdaların ambalajlanması; kalitenin korunması, çevresel, fiziksel ve mikrobiyolojik faktörlerden koruma gibi temel işlevleri yerine getirmektedir. Son zamanlarda, değişen tüketici tercihleri ve beklentileri ile ambalajın rolü temel işlevinin de ötesine geçmiştir. Gıda ambalajlama sistemlerindeki yenilikler ve akıllı ambalajlama çözümleri daha güvenli ve yüksek kaliteli gıda ürünlerinin piyasaya sunulmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca yeni gelişmeler etkileşimli ambalajlama sistemlerinin geliştirilmesi ile akıllı ambalajlama sistemlerinin daha da gelişmesine imkân tanımıştır. Bu sistemler, gıda güvenliğini sağlamak için kalite göstergeleri görevi görmekte ve genel olarak doğrudan (nem, zaman-sıcaklık, tazelik ve biyosensör) veya pasif (izlenebilirlik ve izleme) göstergeler olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Sonuç: Bu derlemede akıllı ambalajlama sistemlerindeki güncel gelişmeler ve ticari uygulamalar değerlendirilmiştir. Akıllı ambalajlama sistemleri ile tüketicilerin ambalajlı gıdaların güvenliği ve raf ömrü hakkında bilgi edinmeleri sağlanmaktadır. Ayrıca akıllı ambalajlama sistemleri, küresel gıda israfının ve kaybının azaltılmasına katkı sunan yeni bir yaklaşımdır.

Anahtar kelimeler: gıda güvenliği; raf ömrü; indikatörler; akıllı etiketler; gıda kalitesi

Abstract

Objective: Food packaging fulfills basic functions such as protection of quality, and protection from environmental, physical, and microbiological factors. Recently, with the changing in consumer preferences and expectations, the role of packaging has gone beyond its basic function. Innovations in food packaging systems and smart packaging solutions help bring safer and higher-quality food products to the market. In addition, new developments have enabled the development of intelligent (smart) packaging systems with the development of interactive packaging systems. These systems act as quality indicators to ensure food safety and are generally classified as direct (humidity, time-temperature, freshness, and biosensor) or passive (traceability and monitoring) indicators.

Conclusion: Current developments in smart packaging systems and commercial applications are evaluated and smart packaging systems are integrated with food applications about the shelf life of packaged foods, it will be possible for consumers to be informed about the quality of foodstuffs and to further reduce food waste.

Keywords: food safety; shelf life; indicators; intelligent labels; food quality

1. Giriş

Ambalajlama, üreticiden tüketicinin eline ulaşmaya kadar kalite ve güvenlik açısından gıdaları fiziksel, kimyasal hem de mikrobiyolojik kontaminasyondan korumada etkili temel rol oynamaktadır. Ambalajlanmış gıdanın raf ömrü, gıdanın hem doğasına (pH, su aktivitesi ve solunum hızı) hem de dış faktörlere (depolama sıcaklığı, bağıl nem) bağlı olarak değişim göstermektedir (Prasad ve Kochhar, 2014; Ghoshal, 2018).

Ambalajın klasik işlevleri olan ürünün muhafazası ve çevresel etkenlerden koruma yanında günümüzde iletişim fonksiyonu da önem kazanmıştır (Bhargava vd., 2020). Ambalajlı gıdaların çevresel koşulları izlenerek, ürün kalitesi ve raf ömrünün müşteri tarafından gözlemlenmesi mümkün hale gelmiştir. Daha açık bir ifadeyle akıllı ambalajlama, ambalajlanmış gıda ürününün iç ve dış ortamlardaki değişiklikleri izleyerek ürünün bulunduğu durum ve kalitesi hakkında bilgi veren iletişim sistemlerini kullanan bilim ve teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Yam, 2012; Drago vd., 2020; Soltani-Firouz vd., 2021). Akıllı ambalajlama sistemleri, gıda güvenliğinin tesis edilmesinde kalite göstergeleri; aktif (nem, zaman-sıcaklık, tazelik ve biyosensör) ve pasif (izlenebilirlik ve izleme) indikatörler olarak sınıflandırılmaktadır (Bhargava vd., 2020).

Akıllı ambalaj, fiziksel dünya ile dijital dünya arasında bir bağlantı kurmakta ve üreticiler, perakendeciler, tüketiciler ve sosyal medya kanalları arasında bir "dijital köprü" işlevi oluşturmaktadır. Ürünün durumunu izlemek, depolama koşulları (sıcaklık) ve tazeliğin izlenmesinde sensörler kullanılmaktadır. Alternatif olarak, göstergeler (indikatörler) veya sensörler, ambalajın dışına veya içine yerleştirilerek ambalaja entegre edilebilmektedir. EFSA (European Food Safety Authority), akıllı ambalaj malzemelerini "ambalajlanmış gıdanın veya gıdanın etrafındaki çevrenin durumunu izleyen malzemeler ve sistemler" olarak tanımlamaktadır (Drago vd., 2020). Akıllı gıda ambalajlama sistemleri; ambalajlanmış gıdanın kalitesini izlemeyi, bulunduğu koşulları algılamayı, kaydetmeyi ve tüketiciye göstererek gıda güvenliğini garanti etmeyi ve ambalajlanmış gıdanın kalitesi hakkında son müşteriye bilgi vermeyi amaçlamaktadır. Basit veya reaktif bir akıllı ambalaj olmasına bağlı olarak, bunlar birincil (dış veya iç), ikincil veya üçüncül ambalaja yerleştirilebilmektedir (Rukchon vd., 2014; Biji vd., 2015; Ghaani vd., 2016).

Gıda üretildikten sonra tüketime kadar kalitenin korunması, ambalajın maruz kaldığı iç ve dış

koşulların (ambalaj içindeki gaz kompozisyonu, bağıl nem, basınç, ışık ve sıcaklık) değişimine bağlı olup, ambalajın bulunduğu dış koşullardaki değişiklikler ambalaj içinde de değişikliğe yol açabilmektedir. Gıda ambalajındaki tepe boşlukları, zaman içinde gıda bileşimlerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Ambalaj içindeki atmosferde gözlenen değişiklikler, transfer ve depolama sırasındaki sıcaklıklar ve gıdaların mikrobiyolojik kalitesini tanımlayabilen, ölçülebilen ve/veya raporlayabilen cihazlar nihai tüketici, üretici ve/veya pazarlamacının pazarlama zincirinde kullanılan koruma stratejilerinin etkinliği hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır (Janjarasskul ve Suppakul, 2018). Ayrıca akıllı ambalajlama, örneğin barkodlar, artırılmış gerçeklik, NFC (Near Field Communication: Yakın Alan İletişimi), hoparlörler, radyo çipleri veya ekranlar aracılığıyla bilgilendirme, otomasyon, pazarlama veya koruma işlevlerini de yerine getirmektedir. Akıllı ambalajlama, gıdanın güvenliğini ve kalitesini sağlamak için; algılama, kayıt, izleme ve bilgileri tüketicilere iletme gibi akıllı işlevleri yerine getirebilen bir ambalajlama sistemi olup ambalajlı ürünün güncel durumu hakkında tüketiciyi bilgilendirmektedir (Coma, 2008; Realini ve Marcos, 2014; Janjarasskul ve Suppakul, 2018; Mustafa ve Andreescu, 2018; Wang vd., 2019). Japonya, Amerika Birleşik Devletleri ve Avustralya başta olmak üzere akıllı ambalajlama teknolojisinin gıda ambalajlamasında kullanımı hızla artmaktadır. Bu sistem, gıda arzının israfını ve eksikliğini azaltmak için verimli bir şekilde çalışabilmektedir. Akıllı ambalaj kullanımı, gıda bilimi ve teknolojisinin en büyük başarı alanlarından biri olma potansiyeline sahiptir (Biji vd., 2015). Akıllı ambalajlama teknolojileri; indikatörler, sensörler ve veri taşıyıcılar olarak üç ana teknoloji temellidir;

(i) **İndikatörler;** Gıdaların kalite özelliklerindeki değişiklikleri izlemektedir. Örnek olarak zaman sıcaklık indikatörleri, gaz bileşimi ve gaz sızıntısı indikatörleri verilebilmektedir. İzleme faktörüne bağlı olarak, bu sistemler ambalajın içine veya dışına yerleştirilebilmektedir (Realini ve Marcos, 2014).

(ii) **Kalite Sensörleri;** Gıdanın kendisinin kalite özelliklerinin doğrudan izlenmesi için kullanılır ve ambalajın içinde bulunmaktadır. Bunlar tazelik sensörleri ve biyosensörlerdir. Kalite göstergeleri genellikle tüketiciler tarafından kalıcı ve yorumlanması kolay renk değişikliklerini göstermektedir (Realini ve Marcos, 2014).

Veri Taşıyıcılar (İzlenebilirlik cihazları): Depolama, dağıtım ve izlenebilirlik amaçlarına yönelik olan barkodlar ve RFID'dir. Bu sistemler yalnızca veri depolamak ve aktarmak için kullanılırken, göstergeler ve sensörler dış ortamı izlemek ve daha sonra bilgileri görüntülemek için kullanılmaktadır. Veri taşıyıcılarının işlevi izlenebilirliği garanti etmek ve otomasyondur

(Muller ve Schmid, 2019). Ayrıca hırsızlık vakalarını azaltmak için hologramlar, özel mürekkepler ve boyalar, lazer ve elektronik etiketler kullanılmaya başlanmıştır (Janjarasskul ve Suppakul, 2018). Çizelge 1'de yaygın olarak kullanılan bazı iç ve dış indikatörlere yer verilmiştir.

Çizelge 1. Yaygın olarak kullanılan bazı iç ve dış indikatörler (Kaur ve Puri, 2017)

İndikatörler	Prencip/Reaktifler	Tüketiciye Verdiği Bilgi	Uygulama
Zaman sıcaklık indikatörleri (Dış)	Mekanik Kimyasal Enzimatik	Depolama durumu	Soğutulmuş ve dondurulmuş koşullarda depolanan gıdalar
Oksijen indikatörleri (İç)	Redoks boyaları pH boyaları Enzimler	Depolama durumu Paket Sızıntısı	Düşük oksijen konsantrasyonlu ambalajlarda saklanan gıdalar
Karbondioksit-indikatörleri (İç)	Kimyasal pH boyaları	Depolama durumu Paket sızıntısı	Modifiye veya kontrollü atmosfer gıda ambalajı
Mikrobiyel büyüme indikatörleri (İç/Dış) veya Tazelik indikatörleri	Belirli metabolitlerle (uçucu veya uçucu olmayan) reaksiyona giren tüm boyalar	Bozulma (Mikrobiyel gıda kalitesi)	Et, balık ve kümes hayvanları gibi çabuk bozulabilir gıdalar
Patojen indikatörleri (İç)	Toksinlerle reaksiyona giren çeşitli kimyasal ve immüno kimyasal yöntemler	<i>Escherichia coli</i> 0157:H7 gibi spesifik patojenik bakteriler	Et, balık ve kümes hayvanları gibi çabuk bozulabilir gıdalar

2. Akıllı ambalajlama teknolojileri

2.1. İndikatörler

2.1.1. Zaman-sıcaklık indikatörleri (TTI)

Gıda ambalajına basılmış olan “en iyi kullanma, tavsiye edilen tüketim tarihi (TETT)” tarihi yalnızca gösterge niteliğindedir ve dağıtım-depolama sırasında gıdaların maruz kalabileceği sıcaklıktaki olası dalgalanmaları dikkate almamaktadır. Sıcaklık, dağıtım ve depolama sırasında gıda ürünlerinin raf ömrünü, kalitesi ve güvenliğini etkileyen önemli bir faktördür. Gıdanın sıcaklık koşullarının izlenmesi ve kaydedilmesi gıda güvenliği açısından önemlidir. Sıcaklıktaki değişim ya da sapma, gıdaların bozulmasına neden olan reaksiyonları hızlandırabilmekte ve mikroorganizmaların çoğalmasına neden olmaktadır. Sıcaklık geçmişinin kontrol edilmesi ve izlenmesindeki zorluk gıdaların raf ömrünü kesin olarak tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır (Pereira de Abreu vd., 2012; Janjarasskul ve Suppakul, 2018; Chen vd., 2020). Nakliye, dağıtım ve depolama sırasında ortam sıcaklık değerlerini izleyerek soğuk zincirin kırıldığını tespit edebilmektedir. Gıda sıcaklığının gerçek geçmişini tespit etmenin zorluğu, raf ömürlerini tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır (Brizio ve Prentice, 2015a).

Zaman sıcaklık göstergeleri (TTI), soğuk zincir geçmişinin görsel olarak bir özetini sunan yeni bir

teknoloji olup termal geçmişi kaydetmek ve depolama, dağıtım ve tüketimleri boyunca dayanıksız ürünlerin kalan raf ömrünü göstermek için kullanılan cihazlardır. Bu, zaman ve sıcaklığın kümülatif etkilerinden kaynaklanan geri dönüşü olmayan renk değişikliği prensibine dayanmaktadır (Wang vd., 2015).

Çalışma prensiplerine göre, TTI; kimyasal, fiziksel, enzimatik ve biyolojik sistemler olarak ayrılmaktadır.

2.1.1.1. Kimyasal zaman sıcaklık indikatörü

Son yıllarda TTI'nin önemli bir bölümünü oluşturan çeşitli kimyasal TTI sistemleri son yıllarda hızla gelişmiştir. Zaman ve sıcaklıktaki değişimin birikmesiyle, TTI kimyasal olarak reaksiyona girerek ve belirli bir renk değişimi meydana gelmektedir. Bu renk değişimi paketlenen ürünün kalitesini belirtmek için kullanılabilir (Taoukis ve Labuza, 2003; Wu vd., 2013).

Günümüzde kimyasal TTI, esas olarak polimerizasyon bazlı TTI, fotokromik bazlı TTI ve oksidasyon reaksiyonu bazlı TTI'dan oluşmaktadır (Wang vd., 2015).

Polimerizasyon bazlı zaman sıcaklık göstergesi; ilk kimyasal TTI türleri, bir monomerin asetilen grubuyla ($R_1C=C-C=CR_2$) katı hal polimerizasyon reaksiyonuna dayanmaktadır. Yüksek sıcaklık ve

yüksek radyasyon gibi dış çevresel koşullarda monomerler 1,4-katılma polimerizasyon reaksiyonunu izlemekte ve $(R_1[C=C-C=C]_nR_2)$ yapısına sahip bir polimer olan polidiasetilen (PDA) bileşiğini oluşturmaktadır. Ana zincir konfigürasyonundaki değişiklikler, polimerin absorpsiyon spektrumunu değiştirerek renk değişikliğine neden olmaktadır (Wang vd., 2015).

Fresh-Check® ve HEATmarker® (TempTime, New Jersey, ABD) gibi bazı asetilen polimerleri ticari TTI'da kullanılmıştır. Bu TTI, renkli opak polimerin renksiz asetilenik monomerden üretildiği 1,4-ilaveli polimerizasyondaki renk değişikliği esasına göre çalışmaktadır (Ellouze ve Augustin, 2010). Ayrıca ısı, kimyasallar, mekanik deformasyon, ışık ve diğerleri gibi uyarılar üzerine floresan özelliklerini değiştiren kromojenik polimerler de araştırılmıştır (Han vd., 2018; Muller ve Schmid, 2019). Etkili bir TTI'nin temel gerekliliği, hedef sıcaklıktaki değişimlere karşı net ve geri döndürülemez bir reaksiyon göstermektir. Bir TTI, gıda ürünleri için güvenli olmalı ve yalnızca gıda ürünlerinin son kullanma tarihinin ne zaman dolacağını kullanıcılara bildirmelidir. Aşağıda piyasada bulunan bazı ticari TTI örneklerine yer verilmiştir;

Fresh-Check® TTI (TempTime Corp., Morris Plains, NJ, ABD) bir katı hal polimerizasyon reaksiyonuna dayanan ve ölçülebilen bir renk değişikliğidir (Tsironi vd., 2008; Pavelková, 2013). Fresh-Check®, iç içe geçmiş iki eş merkezli daireden oluşmaktadır. Polimer, dış koyu renkli halkanın aksine iç açık renkli halkaya yerleştirilmekte, sıcaklık yükseldikçe ve reaksiyon süresi arttıkça, gıda kalitesindeki kayıpla orantılı bir hızda iç açık renk kademeli olarak açıktan koyuya doğru değişmektedir. Sıcaklık ne kadar hızlı yükselirse, polimerde renk değişiklikleri o kadar hızlı gerçekleşmektedir. Bu göstergeler meyveli kek, marul, süt ve soğutulmuş gıdalarda kullanılmaktadır (Mendoza vd., 2004; Manjunath, 2018; Chowdhury ve Morey, 2019).

HEAT marker®, diasetilen monomerlerinin polimerizasyonuna dayanan TempTime®'ın ticari bir TTI'sidir. Özellikle aşı viallerin izlenmesi için tasarlanmıştır. HEAT marker®, referans olarak donuk sarı bir daireden ve diasetilen monomerlerle kaplı hafif bir dikkörtgen alandan oluşmaktadır. Tüm tedarik zincirini izlenebilir, içteki dikkörtgenin renginin donuk daire ile aynı olması ile kullanıcıları bilgilendirmektedir (Wang vd., 2015)

Fotokromik tabanlı zaman sıcaklık göstergesi; Bu kimyasal TTI, belirli bir renk sergilemek için ışığın belirli dalga boylarıyla aktive edilen

fotokromik bir bileşiğe dayanmaktadır. TTI'yi hazırlamak için ters reaksiyon işleminde termal olarak indüklenen solma ilkesi kullanılmaktadır. Işık enerjisinin emilmesi, ışığın yansınması, yayılması, bir enerji transferi veya dönüşümü gibi tersine çevrilebilir renk değiştirme olaylarını kolaylaştırmaktadır (Sadeghi vd., 2019). Reaksiyon hızı ve solma derecesi, zaman ve sıcaklığın artmasıyla değişmekte, böylece raf ömrü tüketiciye gözle görülür şekilde gösterilebilmektedir. Fotokromik bileşikler şarj edilmeden önce stabildir ve düşük çalışma sıcaklığına maruz kaldığında renk stabil kalmaktadır. Bu nedenle, bu tür TTI, düşük sıcaklıkta otomatik bir şarj cihazı ile belirli dalga boylarındaki ışığa, genellikle ultraviyole ışığa maruz bırakılarak etkinleştirilmektedir. Günümüzde, akıllı ambalajlamada kullanılan fotokromik bileşikler esas olarak spiraromatik hidrokarbon ve diaril vinil bileşiklerinden oluşmaktadır (Wang vd., 2015).

Uyaranın kaynağına bağlı olarak, kromojenik malzemeler elektrokromik (elektrik alanı), termokromik (ısı), fotokromiv (ultraviyole-UV) solkatokromik (çözücüler-nem), biyokromik (oatojenler), kemokromik (kimyasal değişimler-pH, iyon, nem) olarak sınıflandırılmaktadır.

Spiropiranlar, spiro-oksozinler ve naftopiranlar endüstride yaygın olarak ticari fotokromik renklendiriciler olarak kullanılmaktadır. Güvenilir veri elde etmek için renk değiştirme süreci bozulma süreci ile senkronize edilmektedir (Maqsoudlou vd., 2019).

OnVu™ TTI (Fuchs, Andre. Schliengen-Obereggenen, Almanya) ambalajın üzerine de basılabilen, spiropiran'ün katı hal reaksiyonuna dayanan ve sıcaklığa duyarlı herhangi bir ürün için kullanılabilen bir TTI etiketidir. Gösterge sistemi, renkli bir "iç kalp" şekli ve renksiz bir "kabuğa" sahip bir "elma" şeklinde tasarlanmış olup, ışığa duyarlı bileşiklere dayanmaktadır (Manjunath, 2018). Işığa duyarlı mürekkep OnVu™ TTI, (Bizerba, Almanya) otomatik bir UV ışık şarj cihazı kullanılarak UV ışığı ile etkinleştirilmektedir. Aktive edilen renk referans renk ile aynı renge geldiğinde ürün raf ömrünün sonuna geldiğini göstermektedir. UV ışığı ile aktive olan organik pigmentler içermekte ve maruz kalma artan sıcaklıkla zamanla renk değiştirmektedir. Mavi iç kalıp, zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak beyaza dönüşmektedir (Pocças, 2001; Taoukis, 2008; Tsironi vd., 2008). Renk bozulması, şarj işleminde kullanılan ışık miktarı ile orantılıdır ve fotokromik pigmenti etkinleştirmek için kullanılan UV ışığının

darbe süresi ve yoğunluğu kontrol edilerek ayarlanabilmektedir. Rengin açığa çıkma süreci ve şarj işlemi, pratik uygulama için önemli gereklilikler olan izotermal ve izotermal olmayan koşullar altında iyi bir şekilde tekrarlanmaktadır (Brizio ve Prentice, 2015b). Bu TTI'lar, 5°C'de raf ömrü 5-6 gün olan et, balık, süt ürünleri ve hazır gıdalar için tasarlanmıştır (Tsironi vd., 2008; Kreyenschmidt vd., 2010; Sharrock, 2012; Pavelková, 2013; Brizio ve Prentice, 2015b; Taoukis ve Tsironi, 2016).

Redox reaksiyon bazlı zaman sıcaklık göstergesi; Redox reaksiyon bazlı TTI, redoks reaksiyonu veya ışığın indüklediği redoks reaksiyonu yoluyla renk değişikliğini göstermektedir. Sistem havadaki oksijenle reaksiyona girmektedir. Reaksiyon hızı, doğrudan zaman ve sıcaklık birikimi ile ilişkili olup, redoks reaksiyonuna dayalı TTI, toksik maddeler, yani antrakinonlar içermektedir. Ayrıca, ortamdaki oksijen redoks reaksiyonunu etkileyeceğinden ve kesin bir gösterge olamadığından ticari olarak kullanılmamaktadır (Wang vd., 2015).

2.1.1.2. Fiziksel zaman-sıcaklık indikatörü

Farklı çalışma prensiplerine dayalı olarak fiziksel TTI; difüzyon bazlı TTI, nanopartikül bazlı TTI, elektronik TTI vb. olarak ayrılabilirler. Yeni teknolojilerin ve malzemelerin gelişmesiyle birlikte, fiziksel özelliklerin renk değiştirmesine dayalı yeni TTI sistemleri geliştirilmektedir. Aşağıda piyasada bulunan bazı ticari TTI örneklerine yer verilmiştir;

Difüzyon tabanlı zaman sıcaklık göstergesi olarak ticarileştirilen monitör Mark™ TTI (3M Company, Minnesota, ABD), tipik bir difüzyon bazlı TTI sistemidir. TTI, renkli bir yağ asidi esterinin yüksek kaliteli kurutma kağıdından yapılmış gözenekli bir fitil boyunca maviye boyanmış bir yağ asidi esteriyile sıcaklığa bağlı difüzyon reaksiyonuna dayanmaktadır. Ölçülebilir yanıtı ise difüzyon mesafesi ile ilgili olup sıcaklık ne kadar yüksekse, difüzyon da o kadar hızlı yayılmaktadır (Wang vd., 2015; Manjunath, 2018). Sistem ile ürünün maksimum depolama sıcaklığını aştığı gün sayısını veya saati göstermektedir (Ghaani vd., 2016).

Tempix şirketi tarafından sunulan Tempix TTI, belirli bir maddenin morfolojik değişimine dayanan başka bir tür ticari fiziksel TTI'dır. Tempix göstergesindeki siyah kontrol çubuğu görüldüğünde, müşteri ürünün soğuk zincirde doğru sıcaklıkta taşındığından ve saklandığından emin olabilmektedir (Şekil 1) (Wang vd., 2015; Drago vd., 2020; Soltani-Firouz vd., 2021).



Şekil 1. Tempix ürününün etiketindeki uygulaması (Anonim, 2021)

Nanoparçacık tabanlı TTI; son yıllarda yapılan çalışmalarda termokromik özelliğe sahip nanomalzemeler TTI'larda uygulanmasını içermektedir. TTI'nin termokromik malzemesi olarak Ag nanoplakalar kullanılmaktadır; Ag nanopartikülünün, ısı emildiğinde, yüzey morfolojisi değişir, bu da dalga sayılarının görünür bir bölgeye kaymasına neden olur (Wang vd., 2015).

Elektronik zaman sıcaklık göstergesi sıcaklık sinyallerini elektrik sinyallerine dönüştüren ve daha sonra elektrik sinyallerini nihai bir görsel çıktıya dönüştüren bir termal sensör ile uyarı görevi üstlenen TTI sistemidir (Wang vd., 2015).

2.1.1.3. Enzimatik zaman-sıcaklık indikatörü

Enzimatik TTI, enzimin substrat ile renk değişimine neden olan hidroliz reaksiyonuna dayanmaktadır. Reaksiyonun kapsamı, zaman ve sıcaklık tarafından belirlenir, bu nedenle renk değişimi zaman ve sıcaklığın kümülatif etkisini ortaya çıkarabilmektedir. Buna göre ürünlerin kalan raf ömürleri dinamik olarak görüntülenebilmektedir (Wang vd., 2015). Enzimatik TTI'lar, diğer sistemler ile karşılaştırıldığında, düşük maliyet, istikrarlı performans ve kolay kontrol gibi birçok avantaja sahiptirler (Jaiswal vd., 2018). Aşağıda piyasada bulunan bazı ticari TTI örneklerine yer verilmiştir;

CheckPoint®/VITSAB (Vitsab, Malmö, İsveç), asit-baz reaksiyonu bazlı ticari bir enzimatik TTI'dır. VITSAB TTI, lipaz enzimine dayalı ilk ticari TTI'dır (Jaiswal vd., 2018). Çalışma prensibi, lipit substratın kontrollü koşullarda lipaz tarafından hidrolize edilmesi ve bunun da pH'ın düşmesi esasına dayanmaktadır (Manjunath, 2018). Sonuç olarak, pH indikatörünün rengi değişmektedir. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, lipit substratın hidroliz hızı o kadar hızlı olmaktadır. Sürekli renk değişimi de ölçülebilmekte ve böylece renk değişimi gözlemlenerek ürün kalitesi tahmin edilebilmektedir (Taoukis, 2008; Tsironi vd., 2008; Kuswandi vd., 2011).

2.1.1.4. Biyolojik zaman-sıcaklık indikatörü

Mayalar ve laktik asit bakterileri son zamanlarda biyolojik TTI sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Maya bazlı zaman sıcaklık göstergesi; Belirli koşullarda, özellikle belirli sıcaklıkta asit üretmek için mayanın anaerobik solunumu sonucunda pH indikatörünün renk değişikliğine dayanan biyolojik bir TTI sistemidir. TTI, reaktan yüzeydeki aktivatör ile temas ettiğinde aktif hale gelmektedir. TTI, asit üretiminden sorumlu olan mayanın aerobik solunumuna dayandığından, sistemdeki glikoz ve oksijen miktarı sıkı bir şekilde ayarlanmalıdır (Varlet-Grancher, 2006; Wang vd., 2015). *Lactobacillus* bazlı TTI'ler, belirli koşullar altında pH'ı değiştirmek için laktik asit bakterileri tarafından üretilen laktik asit üretimi ve mikrobiyal gelişme sonucunda oluşan laktik asit kaynaklı pH değişikliğine dayanmaktadır. Bu da zaman ve sıcaklığın birikim etkisini belirtmek için renk değişimine yol açmaktadır (Lu vd., 2013). Genel bir mikrobiyal temelli TTI sistemlere örnek olarak Traceo[®], Traceo Resrauration[®] ve eO[®] Gentilly sistemleri verilebilmektedir (Choi vd., 2014).

EO[®] TTI (CRYOLOG, Gentilly, Fransa), uygun pH göstergeleri aracılığıyla renk değişimiyle ifade edilen, kontrollü mikrobiyal büyüme seçilmiş laktik asit bakteri suşlarının neden olduğu zaman-sıcaklığa bağlı bir pH değişikliğine dayanmaktadır (Pavelková, 2013).

Mevcut zaman sıcaklık gösterge sistemleri, özelliklerine göre güvenilir ve tekrarlanabilir cevaplar sağlamaktadır. Zaman-sıcaklık göstergeleri, zaman geçmişinde biriken ürün sıcaklıkları hakkında görsel bir özet sağlar ve zamanın ve sıcaklığın etkilerini kaydetmektedir (Ellouze ve Augustin, 2010; Manjunath, 2018). Piyasada farklı özelliklere sahip olan bazı ticari zaman-sıcaklık indikatörleri (TTI) ise; OnVu[™], OnVu Ice, Monitor Mark[™], WarmMark, CheckPoint, ColdSNAP, Fresh-Check[®], VarioSens[®], Log-ic[®], ThermRF, ShockWatch, Coldmark ve HeatWatch'tir (Pereira de Abreu vd., 2012; Pavelková, 2013). 9860A-H, 9861A ve 9864C kategorilerini içeren Monitor Mark[™] TTI'lar geniş zaman ve sıcaklık aralıklarında mevcut olup, çabuk bozulan yiyecekler, aşular, kan ve diğerleri için soğuk zincir lojistiğini izlemek için kullanılabilir (3M Food Safety, 3M[™] Monitor Mark[™]) (Kuswandi vd., 2011; Pavelková, 2013).

2.1.2. Tazelik ve/veya olgunluk indikatörleri

Gıda kalite göstergeleri olarak da adlandırılan tazelik sensörleri, tazelik ve güvenlikte değişiklikler meydana getiren biyokimyasal süreçlerin veya mikrobiyal büyümenin ürünlerini doğrudan izlemektedir. Sıcaklık kontrollü tedarik zincirinin kesintiye uğraması (örn. Soğuk zincir) veya ambalaj bütünlüğünde fark edilemeyen

bozulma durumunda şüpheli olabilecek gıda ürünlerinin gerçek durumunun izlenmesine izin vermektedir. Tazelik göstergeleri, belirtilen son kullanma tarihine rağmen tüketiciyi gıda bozulmasına karşı uyarabilmektedir. Tazelik göstergeleri, gıda ürünündeki kimyasal değişikliklere veya hedef mikroorganizmalar ve bunların gıda bozulmasına neden olan metabolitleri (karbon dioksit ve kükürt, amonyak, uçucu nitrojen bileşikler, biyojenik aminler, hidrojen sülfür, diasetil, etanol veya organik asitler, enzimler ve toksinler) ve kimyasal reaksiyonlara (lipit oksidasyonun) dayalı olarak ürün kalitesi (tazelik) hakkında bilgiler vermektedirler. Bu bozulma bileşenler ile temas halinde olabilmesi için tazelik göstergelerinin ambalajın içerisine yerleştirilmesi gerekir. Gösterge sistemine bağlı olarak, bu bilgiler farklı yöntemlerle tespit edilebilir (Lee vd., 2019; Muller ve Schmid, 2019). Özellikle renk bazlı pH duyarlılık göstergeleri, paketlenmiş balık, karides, broyler tavuk tazelik için mikrobiyal metabolitlerin belirlenmesi açısından umut verici akıllı ambalajlama olarak bildirilmektedir (Kuswandi vd., 2011; Kalpana vd., 2019; Lee vd., 2019). Bu göstergeler, et ve su ürünleri bozulduğunda oluşan uçucu aminlerin neden olduğu tepe boşluğunun pH'ındaki artış nedeniyle asitten bazik forma dönüştürülen bromokresol yeşili, kurkumin, bromokresol moru doğal boyalardır (Ezati vd., 2019; Moradi vd., 2019). Depolamada özellikle et ürünlerindeki hidrojen sülfür veya n-bütirat, L-laktik, D-laktat ve asetik asit gibi organik asitlerin konsantrasyonundaki artışlar ile meyveler ve sebzelerde gözlenen metabolit oluşumu, pH değişimi, mikrobiyal metabolitlerin ve olgunluğun göstergeleri uygun indikatörleri olarak bu sistemlerde kullanılmaktadır (Pereira de Abreu vd., 2012; Ghaani vd., 2016; Janjarasskul ve Suppakul, 2018). Gıda proteinlerinin mikrobiyal bozunmasının bir diğer göstergesi ise uçucu bazik nitrojendir. Trimetilamin (TMA), amonyak (NH₃) ve dimetilamin (DMA) gibi volatil aminler toplam uçucu bazik nitrojen bileşiklerini (TVB-N) içermektedir. Bu nedenle, pH'a duyarlı boyalar et, balık ve kümes hayvanlarında temel uçucu aminlerin tespiti için sensörler geliştirmek için kullanılabilir. Ana hedef ise, metabolit olarak CO₂ kullanan, pH boyalarına dayalı birkaç tazelik göstergesi konsepti geliştirmek olup, pH boyası bromotimol mavisinin mikrobiyal büyüme yoluyla CO₂ oluşumunun bir göstergesi iyi bir örnektir (Kalpana vd., 2019; Lee vd., 2019).

Tazelik indikatörleri başlıcaları ise pH'a duyarlı indikatörler, uçucu azot bileşiklerine duyarlı indikatörler, hidrojen sülfite duyarlı indikatörler ve

çeşitli mikrobiyal metabolitlere duyarlı indikatörlerdir. Tazelik ve/veya olgunlaşma göstergeleri FreshTags®, Timestrip®, RipeSense® ve SensorQ™ şeklindedir. Aşağıda piyasada bulunan bazı ticari TTI örneklerine yer verilmiştir;

FreshTag®, karides, kabuklu deniz ürünleri ve beyaz etlerin depolama sırasında üretilen uçucu aminleri gazların reaktifle temas etmesine izin vermektedir, bu ise etiketteki fitilin parlak pembe renge dönüşmesine ve görsel olarak tazelik tazelikliğini izlemek için kullanılmaktadır (Ellouze ve Augustin, 2010).

SensorQ™ özellikle sığır ve kümes hayvanları için tasarlanmış ve ambalajın içindeki gazlarda, özellikle sülfid gazında mikrobiyel büyüme ile artışa dayanmaktadır (Fuertes vd., 2016).

Olgun indikatörü; Auckland Plant ve Food Research tarafından geliştirilen gıdaların kalitesini gösterebilen başka bir akıllı indikatördür. Olgunluk göstergeleri, meyve olgunlaşması, meyvelerin daha yenilebilir olmalarına neden olan bir süreçtir. Olgunlaşma sürecinde klorofil kaybı; karotenoid ve antosiyanin üretimi, nişastanın şekere dönüştürülmesi; organik asitler, proteinler ve yağlardaki değişiklikler; aroma gelişimi, etilen üretimi ve tanenlerin ve fungistatik bileşiklerin azaltılması gibi meydana gelmektedir. Bazı meyvelerde, renkteki değişiklikler, tüketicilerin meyvelerin olgunlaşmış yenmeye durumu bilgisi verirken (örneğin kayısı, muz ve çilek gibi), bazıları ise açık olgunlaşma belirtileri göstermemektedir. İndikatörler, meyvelerin olgunlaştıkça verdikleri aroma esterleri tespit ederek renk değiştirirler. Fenol kırmızısı başlangıçta kırmızı renkte (pH 8,4) yavaş yavaş turuncu-kırmızı, turuncu ve en son olarak asidik formda ise sarı renke (pH 6,8) dönüşmektedir (Janjarasskul ve Suppakul, 2018).

RipeSense® meyvelerin olgunlaşmasını derecesini kolorimetrik olarak gösterebilen bir indikatördür. Bu sensör, meyvenin olgunlaşırken karakteristik ürettiği aroma ve aromatik bileşikler belirlenip, reaksiyona girmesine ve renk değiştirmesine dayanmaktadır. İndikatörün başlangıç rengi kırmızıdır (gevrek meyveyi gösterir) ancak yavaş yavaş turuncuya (sert) ve son olarak sarıya dönmektedir (meyvelerin tamamen olgunlaşmış ve en sulu noktada olduğu). İndikatörün rengini meyve olgunlaşma derecesi ile eşleştirerek, müşteriler meyveyi sırasıyla “çıtır/kıtır”, “sert” ve “sulu” olarak doğru bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu teknoloji, armut, kivi, kavun, mango, avokado ve çekirdekli meyve gibi meyvelere uygulanmaktadır (Pereira de Abreu vd., 2012; Ghaani vd., 2016).

3. Sensörler

Sensörler, akıllı ambalajlama sistemleri içerisinde yenilikçi ve en umut verici teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Sensör sayesinde, fiziksel veya kimyasalların özelliği veya kimyasalların konsantrasyonunu tespit edebilmektedir (Ghaani vd., 2016; Janjarasskul ve Suppakul, 2018). Aşağıda belirtildiği şekilde farklı parametreleri araştıran farklı tipte sensörler vardır.

3.1. Gaz sensörleri

Bu sensörlerle CO₂ veya H₂S gibi belirli gazların konsantrasyonu izlenerek bozulmanın ilerlemesi belirlenmektedir (Ghaani vd., 2016; Janjarasskul ve Suppakul, 2018).

3.1.1. Biyosensörler

Biyolojik reaksiyonların algılanması, kaydedilmesi ve iletilmesini sağlayan kompakt cihazlardır. Kimyasal biyosensörler ve sensörler arasındaki temel fark tanıma katmanında yatmaktadır. Kimyasal sensörlerde reseptör kimyasal bir bileşik iken, biyosensörlerin tanıma katmanı enzimler, antikorlar, hormonlar, antijenler, fajlar ve nükleik asitler gibi biyolojik malzemelerdir ve biyolojik malzemelerden yapılmış bir reseptöre sahiptirler (Pereira de Abreu vd., 2012; Ghaani vd., 2016).

Toksin Guard™, Monoklonal antikorları içeren biyokimyasal sensörlerden oluşan tazelik bozulması indikatörüdür. Salmonella spp., Campylobacter spp., Listeria spp. ve *Escherichia coli* bakteriler ile pestisitler gibi kimyasallar ve genetik modifikasyon markerleri gibi diğer patojenleri saptayabilmektedir (Sonuç görsel bir sinyal ile gösterilir) (Pereira de Abreu vd., 2012).

Diğer akıllı ambalajlama sistemleri; Sözü edilen sistemlere kıyasla daha az uygulama alanı bulan akıllı cihazlar arasında “termokromik mürekkep” sistemler ve “doneness=iyi pişmiş” göstergeleri bulunmaktadır. Bazı durumlarda, renk değişikliğine eş zamanlı olarak “kullanır-içilmeye hazır” gibi kısa bir mesaj görüntülenmektedir.

4. Veri taşıyıcılar (İzlenebilirlik cihazları)

Dağıtım zincirinde ürünlerin takibini, daha fazla bilginin kayıt altında alınmasını ve istenildiği zamanda ulaşılmasına imkân sağlayan bir teknolojidir. Gıda endüstrilerinin küreselleşmesi ile izlenebilirlik önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle güvenilir bir tanımlama ve izleme sistemine duyulan ihtiyaç, tüketiciye ulaşan gıdaların güvenliğini ve kalitesini sağlamak için gereklidir. Gıda izlenebilirliği, tedarik zinciri optimizasyonu, ürün güvenliği, tüketici güveni ve daha fazla pazara erişim gibi birçok avantaj

sağlamaktadır. İzlenebilirlik, tedarik zinciri içinde bir şeyler ters gittiğinde ürün geri çağırma gibi düzeltici eylemlerin hızlı ve etkili bir şekilde uygulanmasına imkân sağlamaktadır. Bu teknolojiler Barkot ve RFID (Radyo frekans tanımlanması) sistemleridir (Anaza vd., 2016).

4.1. Barkod

Barkod; farklı kalınlıktaki dik çizgiler ve boşluklardan oluşan, verilerin otomatik olarak hatasız biçimde başka bir ortama aktarılması için kullanılan bir yöntemdir. Kodlanan bilgiler, bilgilerin depolandığı ve işlendiği bir sisteme ileten optik bir barkod tarayıcı tarafından okunmaktadır. Barkod sistemleri perakende sektörü için bir gerekliliktir; envanter doğruluğunu artırmaya, zamandan tasarruf etmede, ucuz, kullanımı kolay ve stok kontrolü, stok kaydı yanında ödeme işlemlerini de kolaylaştırmaktadır. Barkodlarda iki genel barkod sınıfı vardır: bir boyutlu (1D veya doğrusal) ve iki boyutlu (2D) sistemlerdir. 1D ve 2D barkod tarama arasındaki temel fark, her birinde depolanabilen verilerin düzenine ve miktarına dayanmaktadır, ancak her ikisi de çeşitli otomatik tanımlama uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilir. Tipine bağlı olarak farklı depolama kapasiteleri vardır (Şekil 2) (Ghaani vd., 2016).

Barkod sisteminin faydaları:

- **Doğruluk:** Kullanıcı hatalarını ortadan kaldırarak bilgiyi doğru, güvenli ve detaylı alınmasını sağlamaktadır.
- **Hız:** İstenen bilgileri çok hızlı ve doğru bir şekilde toplayarak, hızlı işlemekte ve iletmektedir.
- **Maliyet:** Doğruluğun ve veri giriş hızının artmasıyla işçilik maliyeti düştüğünden daha ekonomiktir.
- **Kullanışlılık:** Çok kolaydır. Hangi ürün ne kadar satıldığı, stokta eksikleri ve verilecek siparişleri hızlı cevap bulmaktadır.



Şekil 2. Bazı Barkod Uygulamaları (Anonim, 2021)

4.1.1. Tek boyutlu barkod çeşitleri

Barkod, 13 basamaklı veriyi temsil edecek şekilde düzenlenmiş paralel boşlukların ve çubuklardan oluşan bir modelidir. Çubukların ve boşlukların farklı düzenlenmesi, verilerin kodlanmasına neden olmaktadır. Kodlanan bilgiler, bilgilerin depolandıkları ve işlendikleri bir sisteme ileten optik bir barkod tarayıcısı tarafından okunmaktadır. Temel çalışma prensibi, lazer ışının sembolün üzerinde hareket ederken, koyu çubukları ve açık alanları taramak için harcadığı göreceli süreyi ölçmektedir.

1D barkod türleri: İlk olarak UPC (Uniform Product Code), daha sonra ise EAN geliştirilmiştir. UPCa, UPCe EAN8, EAN13, Kod 128, Kod 39, Interleaved 2/5, Databar, USPS ve IMB gibi değişik çeşitleri bulunmaktadır.

EAN barkodun UPC numaralandırma sisteminden üretilmiş ve genellikle Avrupa'da kullanılan bir numaralandırma sistemidir. Başlangıçta Avrupa ülkelerinde mal numaramla birliğini amaçlamış ve üye her ülkeye iki haneli numara tahsis edilmiştir. Ancak, hızla geliştiğinden, Kuzey Amerika'da kullanılan UPC (Uniform Product Code) ile uyumlu hale getirilerek kullanımı Avrupa sınırlarını aşmıştır. EAN, Belçika yasalarına göre kurulmuş olup, kazanç amacı bulunmamaktadır. Birliğe, Türkiye de dahil olmak üzere toplam 78 ülke üyedir. UPC/EAN, sadece nümerik olup, karakterler arasındaki boşluklar da bilgi içerdiğinden, sürekli bir koddur. EAN-13 ve EAN-8 olarak 2 türü bulunmaktadır (Peker ve Caner, 2006).

4.1.2. İki boyutlu barkod çeşitleri

İki boyutlu (2D) barkodlar, barlar ve boşluklar yerine, bir dizi veya matriste düzenlenmiş nokta ve boşlukları birleştirerek daha fazla bellek kapasitesi (ambalaj tarihi, parti numarası, ambalaj ağırlığı, besin bilgileri veya hazırlama talimatları vb.) sunmaktadır. 2D barkod yalnızca alfa sayısal bilgilerin yanı sıra, resimler, web sitesi adresleri, ses ve diğer ikili veri türlerini de içerebilmektedir. Yapıları nedeniyle, 2D barkodlar fiziksel olarak daha küçük görünmesine rağmen 1D kodlarından (2000 karaktere kadar) daha fazla veri (karakterleri kodlar) tutabilmektedir. Veriler desenin hem dikey hem de yatay düzenine göre kodlanarak böylece iki boyutta okunabilmektedir. Tek boyutlu barkodlar genellikle örnek numarası gibi yalnızca bir veri parçasını izlemektedir. İki boyutlu barkodlar, örnek kimliği, müşteri kimliği, lot numaraları ve daha fazlası dahil olmak üzere daha fazla veri kodladığından perakendeciler ve tüketiciler için büyük kolaylık sağlamaktadır. Her iki tip de

belirlenen bir mesafeden bir optik 2D barkod tarayıcı kullanılarak (barkod tarayıcı veya akıllı telefon kamerası) okunmaktadır. 2D barkodlara örnek olarak QR (hızlı yanıt) kodları verilebilmektedir. 2D barkod tarayıcılar 3 metreden daha uzak mesafeden okuyabilmektedir. 2D barkod sembolojisi çoğunlukla lojistik uygulamalar (özellikle otomotiv endüstrisinde), nakliye sistemleri (nakliye etiketleri vb.), tanımlama ve belge yönetimi (sürücü lisansları, pasaportlar vb.) alanlarında kullanılmaktadır (Anonim, 2022).

2D barkod türleri: QR Code, Data Matrix, PDF417, Aztek ve MaxiCode gibi 2D barkodlar verileri kodlamak için kareler, altıgenler, noktalar ve diğer şekil desenlerini kullanılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. 2D Barkod türlerinden karekoda ait bazı uygulamaları (Anonim, 2021)

4.2. Radyo frekansı ile tanımlama (RFID)

Radyo Frekansı Tanımlama (RFID), fiziksel olarak yerleştirilmiş elektronik etiketin radyo frekansları kullanarak bir okuyucu sayesinde nesnelere otomatik olarak tanımlama yöntemidir. Tipik bir RFID sistemi, RFID etiketleri (elektronik mikroçipin), okuyucu anten (radyo sinyallerini), RFID okuyucu (alıcı-verici) ve yazılım sistemi (yerel ağ, web sunucusu vb.) bulduran ana bilgisayar (veri tabanı, uygulama yazılımı) olmak üzere dört temel bileşenden oluşur (Ghaani vd., 2016).

RFID etiketi, radyo dalgalarını kullanarak algılama, tanımlama ve izlenebilirlik amacıyla bir nesneye yerleştirilir. RFID okuyucu, RFID cihazlarından/etiketlerinden bilgileri okuyan ve bilgileri veri tabanına aktarmak için ağa bağlanan RFID sistemindeki önemli donanım bileşenlerinden biridir. Okuma aşaması çok hızlı ve otomatiktir. Yazılım, RFID okuyucuyu kontrol eder, taramayı başlatır ve etiketlerden bilgi alır ve bilgileri yerel bir bilgisayara depolar veya bulut depolamaya göndermektedir (Anonim, 2022).

RFID teknolojisinin iki farklı özelliği ise; etikette saklanabilen kodun ve uzun mesafelere bile bilgi aktarma ve iletişim kurarak otomatik ürün tanımlanabilmesi ve izlenebilirlik özelliğine sahip olmasıdır (Saleem vd., 2012). RFID teknolojisi

etiketler Aktif RFID etiketleri ve Pasif RFID etiketleri olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Aktif RFID, güç kaynağı olarak bir pil içeren ve aktif bir vericiden oluşan gerçek aktif olan etiketlerdir. Pasif RFID ise etiketleri ise okuyucu birimi tarafından güç verildiğinden ve daha yüksek güç gerektiren dahili pil güç kaynağına sahip olmayan etiketlerdir. Pasif etiketler bir pil içermediğinden ve bir yanıt oluşturmak için okuyucu sinyaline veya geri saçılmaya bağlı olduğundan, okuma aralıkları aktif bir RFID etiketi kadar güçlü değildir; okuma mesafesi 10 metreden fazla değildir. RFID sistemlerinde frekanslar dört kısımda incelenmektedir: düşük frekanslar (125-134 kHz), yüksek frekanslar (13.553-13.567 MHz), ultra yüksek frekanslar-UHF (400-1000 MHz) ve mikrodalga frekanslar ise (2.45 GHz). Okuma uzaklığı frekansın artmasıyla artmaktadır. Düşük frekanslar genellikle kartlı sistemlerde giriş kontrolünü sağlamak için, yüksek frekanslar yolcu çantalarının taşınmasında kullanılmaktadır. Okuma ve takip aralığı yüksek olduğundan, UHF en fazla kullanılan tekniktir. Gelişmiş RFID sistemi (2.45 GHz süper yüksek frekans aktif etiketler) mikrodalga frekanslar ise genellikle demiryollarının izlenmesinde kullanılmaktadır (Bibi vd., 2017).

RFID'nin "barkodlar" üzerindeki ana avantajları, uzaktan kontrole izin vermeleri, farklı bilgileri (menşei, proses parametreleri, ticari bilgiler vb.) depolamaları ve aynı anda birden çok öğenin izlenmesine izin vererek ürünün benzersiz bir şekilde tanımlanmasıdır. Bugün gelişerek büyüyen RFID sistemi üretim faaliyetleri ve tedarik zincirlerinde maliyet, üretim süresi gibi önemli kriterler açısından tercih edilen bir teknoloji olmuştur. RFID sistemlerinin kullanımı gıda kalitesini etkileyen iki ana faktör depolama süresi ve sıcaklığın izlenebilmesi ve gıda tedarik zincirinin takibi için önem arz etmektedir. RFID etiketi ile ürün arasındaki iletişim kolay olup, katı gıdalarda daha kolay uygulanma alanı bulmakta, sıvı gıdalarda ise genellikle ambalajların yüzeylerinde kullanılmaktadır (Saleem vd., 2012).

5. Sonuç

Akıllı ambalajlama sistemi, bilgi sağlama, raf ömrünü uzatma, gıda kalitesini iyileştirme ve güvenliği artırma avantajlarına sahiptir. Tüketiciler bütünlük, tazelik ve özgünlük beklerken; işletmeciler, distribütörler ve perakendeciler, yüklenme ve stok rotasyonunu kolaylaştırmak ve pazarlamayı geliştirmek için akıllı ambalajlama kullanılmaktadır. Yeni nesil akıllı ambalajlama sürekli büyüyen gıda tedarik zincirinin taleplerini karşılamak için daha yüksek bir kalite güvencesi

sunacak ve raf ömrünün en üst düzeye çıkarılmasını sağlayacaktır. Günümüzde akıllı ambalajlama esas olarak ilaç ve kozmetik endüstrilerinde kullanılarak daha yüksek seviyede ürün güvenliği sağlamaktadırlar. Gıda sektöründe, TTI sıcaklık dalgalanmaları izlenmesinde kullanılmakta; barkodlar ve RFID ise daha iyi izlenebilirlik sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, akıllı ambalaj teknolojilerinin çoğu, esas olarak bu tür entegre sistemlerin geliştirilmesi ve üretilmesinin yüksek üretim maliyeti ve uluslararası standart düzenlemelerin olmaması nedeniyle ticari uygulamaları hala sınırlıdır.

Son yıllarda bu konuda Web of Science (WOS) veri tabanı üzerinde yapılan taramada; hakemli özgün bilimsel makaleler 1541 adet, bilimsel derlemeler 240 adet, kitap bölümleri 57 adet ve bilimsel konferans bildirilerde ise 1029 adet çalışmaya konu olmuştur. Ayrıca bu çalışmalara 46000'den fazla atıf (h-endeksi:98) yapılmış olması konunun güncelliği hakkında bilgi vermektedir. Akıllı sistemler gıda ambalajları ile entegre edildiğinde, tüketicileri gıda maddelerinin kalitesi hakkında bilgilendirebilir ve sadece ürün kalitesini ve raf ömrünü artırmakla kalmayarak taze gıda israfını daha da azaltabilir.

6. Kaynaklar

Anaza, S.O., Abdulazeez, M.S., Anugboba, I., Anako, S.I., ve Abdullahi, K.U. (2016). A review of radio frequency identification (RFID) system. *International Journal of Electrical and Electronics Research* 4(4), 79-86.

Anonim, 2021. The indicator. <https://www.tempix.com/the-indicator>. (Erişim tarihi: 01.09.2021).

Anonim, 2022. Components of RFID technology and applications. <https://www.rfpage.com/components-of-rfid-technology-and-applications/> (Erişim tarihi: 15.04.2022).

Bhargava, N., Sharanagat, V.S., Mor, R.S., ve Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology* 105, 385-401.

Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., ve Sorli, B. (2017). A review: Rfid technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of

food products. *Trends in Food Science & Technology* 62, 91-103.

Biji, K.B., Ravishankar, C.N., Mohan, C.O., ve Srinivasa Gopal, T.K. (2015). Smart packaging systems for food applications: A review. *Journal of Food Science and Technology* 52(10), 6125-6135.

Brizio, A.P.D.R., ve Prentice, C. (2015a). Development of Aa new time temperature indicator for enzymatic validation of pasteurization of meat products. *Journal of Food Science*, 80(6), M1271-1276.

Brizio, A.P.D.R., ve Prentice, C. (2015b). Development of an intelligent enzyme indicator for dynamic monitoring of the shelf-life of food products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 30, 208-217.

Chen, S., Brahma, S., Mackay, J., Cao, C., ve Aliakbarian, B. (2020). The role of smart packaging system in food supply chain. *Journal of Food Science* 85(3), 517-525.

Choi, D.Y., Jung, S.W., Kim, T.J., ve Lee, S.J. (2014). A prototype of time temperature integrator (TTI) with microbeads-entrapped microorganisms maintained at a constant concentration. *Journal of Food Engineering* 120, 118-123.

Chowdhury, E.U., ve Morey, A. (2019). Intelligent packaging for poultry industry. *Journal of Applied Poultry Research* 28(4), 791-800.

Coma, V. (2008). Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products. *Meat Science* 78(1-2), 90-103.

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

Ellouze, M., ve Augustin, J.C. (2010). Applicability of biological time temperature integrators as quality and safety indicators for meat products. *International Journal of Food Microbiology* 138(1-2), 119-129.

Ezati, P., Tajik, H., Moradi, M., ve Molaei, R. (2019). Intelligent ph-sensitive indicator based on starch-cellulose and alizarin dye to track freshness of rainbow trout fillet. *International*

- Journal of Biological Macromolecules* 132, 157-165.
- Fuertes, G., Soto, I., Carrasco, R., Vargas, M., Sabattin, J., ve Lagos, C. (2016). Intelligent packaging systems: Sensors and nanosensors to monitor food quality and safety. *Journal of Sensors* 1-8.
- Ghaani, M., Cozzolino, C.A., Castelli, G., ve Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology* 51, 1-11.
- Ghoshal, G. (2018). Recent trends in active, smart, and intelligent packaging for food products. In: *Food packaging and preservation* Grumezescu, A.M. and Holban, A.M. (Eds.), Academic Press, pp. 343-374.
- Han, J.W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J.P., ve Yang, X.T. (2018). Food packaging: A comprehensive review and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 17(4), 860-877.
- Jaiswal, R.K., Mendiratta, S.K., Talukder, S., Soni, A., ve Saini, B.L. (2018). Enzymatic time temperature indicators: A review. *The Pharma Innovation Journal* 7(10), 643-647.
- Janjarasskul, T., ve Suppakul, P. (2018). Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58(5), 808-831.
- Kalpana, S., Priyadarshini, S.R., Maria Leena, M., Moses, J.A., ve Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology* 93, 145-157.
- Kaur, S., ve Puri, D. (2017). Active and intelligent packaging: A boon to food packaging. *International Journal of Food Science and Nutrition* 2, 15-18.
- Kreyenschmidt, J., Christiansen, H., Hübner, A., Raab, V., ve Petersen, B. (2010). A novel photochromic time-temperature indicator to support cold chain management. *International Journal of Food Science & Technology* 45(2), 208-215.
- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Jayus, Abdullah, A., Heng, L.Y., ve Ahmad, M. (2011). Smart packaging: Sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety* 5(3-4), 137-146.
- Lee, E.S., Park, S.Y., ve Ha, S.D. (2019). Application of combined uv-c light and ethanol treatment for the reduction of pathogenic escherichia coli and bacillus cereus on gwamegi (semidried pacific saury). *Journal of Food Safety*, 1-9.
- Lu, L., Zheng, W., Lv, Z., ve Tang, Y. (2013). Development and application of time-temperature indicators used on food during the cold chain logistics. *Packaging Technology and Science* 26, 80-90.
- Manjunath, B.J. (2018). Time temperature indicators for monitoring environment parameters during transport and storage of perishables: A review. *Environment Conservation Journal* 19(3), 101-106.
- Maqsoudlou, A., Sadeghi Mahoonak, A., Mora, L., Mohebodini, H., Ghorbani, M., ve Toldrá, F. (2019). Controlled enzymatic hydrolysis of pollen protein as promising tool for production of potential bioactive peptides. *Journal of Food Biochemistry*, e12819.
- Mendoza, T.F., Welt, B.A., Otwell, S., Teixeira, A.A., Kristonsson, H., ve Balaban, M.O. (2004). Kinetic parameter estimation of time-temperature integrators intended for use with packaged fresh seafood. *Journal of Food Science* 69, FMS90-96.
- Moradi, M., Tajik, H., Almasi, H., Forough, M., ve Ezati, P. (2019). A novel pH-sensing indicator based on bacterial cellulose nanofibers and black carrot anthocyanins for monitoring fish freshness. *Carbohydrate Polymers* 222, 115030.
- Muller, P., ve Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods* 8(1).
- Mustafa, F., ve Andreescu, S. (2018). Chemical and biological sensors for food-quality monitoring and smart packaging. *Foods* 7(10).

- Pavelková, A. (2013). Time temperature indicators as devices intelligent packaging. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 61(1), 245-251.
- Peker, Y., ve Caner, C. (2006). Gıdaların etiketlenmesi ve çizgi kod sistemi (barkod). *Akademik Gıda* 4(21), 37-41.
- Pereira de Abreu, D.A., Cruz, J.M., ve Paseiro Losada, P. (2012). Active and intelligent packaging for the food industry. *Food Reviews International* 28(2), 146-187.
- Pocças, M. (2001). Innovations in intelligent packaging technologies for perishable foods. In: *Novel processes and control technologies in the food industry*, Bozoglu, F., Deak, T. and Ray, B. (Eds.), NATO ScienceSeries, IOS Press, Netherlands.
- Prasad, P., ve Kochhar, A. (2014). Active packaging in food industry: A review. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* 8(III), 1-7.
- Realini, C.E., ve Marcos, B. (2014). Active and intelligent packaging systems for a modern society. *Meat Science* 98(3), 404-419.
- Rukchon, C., Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., Jinkarn, T., ve Suppakul, P. (2014). Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. *Talanta* 130, 547-554.
- Sadeghi, K., Lee, Y., ve Seo, J. (2019). Ethylene scavenging systems in packaging of fresh produce: A review. *Food Reviews International* 37(2), 155-176.
- Saleem, H., Khan, M.Z.A., ve Afzal, S. (2012). Review of various aspects of radio frequency identification (RFID) technology. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE)* 8(1), 01-06.
- Sharrock, K.R. (2012). Advances in freshness and safety indicators in food and beverage packaging. *Emerging food packaging technologies* (pp. 175-197).
- Soltani-Firouz, M., Mohi-Alden, K., ve Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International* 141, 110113.
- Taoukis, P., ve Tsironi, T. (2016). Smart packaging for monitoring and managing food and beverage shelf life. *The stability and shelf life of food* (pp. 141-168).
- Taoukis, P.S. (2008). Application of time-temperature integrators for monitoring and management of perishable product quality in the cold chain. *Smart packaging technologies for fast moving consumer goods* (pp. 61-74).
- Taoukis, P.S., ve Labuza, T.P. (2003). Time-temperature indicators (TTI). In: *Novel food packaging techniques*, Ahvenainen, R. (Ed.), Woodhead Publishing Limited, CRC Press LLC, Cambridge, UK, pp. 103-126
- Tsironi, T., Gogou, E., Velliou, E., ve Taoukis, P.S. (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(1), 108-115.
- Varlet-Grancher, X., 2006. Time temperature indicator (TTI) system, Patent.
- Wang, L., Wu, Z., ve Cao, C. (2019). Technologies and fabrication of intelligent packaging for perishable products. *Applied Sciences* 9(22).
- Wang, S., Liu, X., Yang, M., Zhang, Y., Xiang, K., ve Tang, R. (2015). Review of time temperature indicators as quality monitors in food packaging. *Packaging Technology and Science* 28(10), 839-867.
- Wu, D., Wang, Y., Chen, J., Ye, X., Wu, Q., Liu, D., ve Ding, T. (2013). Preliminary study on time-temperature indicator (tti) system based on urease. *Food Control* 34(1), 230-234.
- Yam, K. L. (2012). Intelligent packaging to enhance food safety and quality. *Emerging food packaging technologies* (pp. 137-152).