



Industry 4.0 and Food Safety in the Food Sector

Hasret Türkoğlu^{1,a}, Duygu Balpetek Külçü^{1,b,*}

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 28100, Giresun, Türkiye.

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Review Article</i></p> <p>Received : 29.11.2024 Accepted : 16.12.2024</p> <p>Keywords: Industry 4.0 Food Industry Traceability Food Safety Industrial revolution</p>	<p>Since the beginning of time, people have had the most basic need for food products (food and beverages) to survive. With the increasing human population, the need for food products has also increased, and with the developing technology, these needs have been tried to be met with mass production in the food sector. However, with the effect of globalization, the safety problem of increasing mass food products has emerged, and this has led societies to create food safety and traceability policies and to create traceability systems. In this review, the stages of the industrial revolution, starting with the 1st Industrial Revolution, which emerged with the use of steam engines in the 18th century, and up to the 4th Industrial Revolution (Industry 4.0), where machines have started to take an active role in industrial processes compared to human power, have been discussed and their effects on the food sector have been examined. Studies on the use of the basic principles and applications of Industry 4.0 in food traceability have been researched and discussed.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 13(3): 821-830, 2025

Gıda Sektöründe Endüstri 4.0 ve Gıda Güvenliği

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Derleme Makalesi</i></p> <p>Geliş : 29.11.2024 Kabul : 16.12.2024</p> <p>Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0 Gıda Sektörü İzlenebilirlik Gıda Güvenliği Endüstri devrimi</p>	<p>Tarihin başlangıcından beri insanların yaşamlarını sürdürebilmeleri için en temel gereksinimleri gıda ürünleri (yiyecek-içecek) olmuştur. Artan insan nüfusu ile gıda ürünlerine olan ihtiyaç da artmış ve gelişen teknolojiyle birlikte, gıda sektöründe gerçekleştirilen seri üretimlerle bu ihtiyaçlar karşılanmaya çalışılmıştır. Ancak küreselleşmenin de etkisiyle artan kitlesel gıda ürünlerinin güvenliği sorunu ortaya çıkmış ve bu da toplumları gıda güvenliği ve izlenebilirliği politikaları ve izlenebilirlik sistemleri oluşturmaya yönlendirmiştir. Bu derlemede 18. yy'da buharlı makinelerin kullanımıyla ortaya çıkan 1. Endüstri Devrimi ile başlayıp günümüzde endüstriyel süreçlerde makinelerin insan gücüne göre etkin bir rol almaya başladığı 4. Endüstri Devrimi (Endüstri 4.0) dahil olmak üzere endüstriyel devrim aşamaları ele alınmış ve bunların gıda sektöründeki etkileri incelenmiştir. Endüstri 4.0'un temel prensipleri ve uygulamalarının gıdada izlenebilirlikte kullanımı ile ilgili çalışmalar araştırılarak tartışılmıştır.</p>

^a hasretturkoglu1993@gmail.com ^b <https://orcid.org/0009-0004-8749-2577> ^c duygu.balpetek@giresun.edu.tr ^d <https://orcid.org/0000-0001-7108-2654>



Giriş

Endüstri 4.0 fikri, Almanya'nın sanayi sektörünü geliştirmek ve sanayisini daha etkili ve üretken hale getirmek için ortaya attığı bir girişim olarak bilinmektedir (Ojo ve ark., 2018).

Faydalarından bazıları; kaynak verimliliğinde iyileşme, maliyet düşürme, pazar erişimi, müşteri memnuniyeti, sistematik yönetim, gelişmiş gıda güvenliği ve şeffaflıktır. Gıda işleme sektöründe Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesinin önündeki en büyük engeller arasında ise; sermaye, beceri ve teknoloji eksiklikleri yer almaktadır. Bu teknolojilerin tarımda uygulanması ve gıda güvenliği sorunlarını çözebilmesinde mevcut altyapının yetersizliği ve dijital okuryazarlık eksiklikleri gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir (Noor Hasnan & Yusoff, 2018; Oruma ve ark., 2021). Gıda israfının azaltılması ve dağıtım verimliliğinin artırılmasında IoT (nesnelerin internet) tabanlı çözümler, gıda tedarik zincirinde kullanım potansiyeline sahiptir.

Gıda sektöründe enerji verimliliği de önemli bir konu olarak öne çıkmakta ve bu konudaki stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir (Clairand ve ark., 2020). Endüstri 4.0'ın sunduğu yeni fırsatlar enerji tüketiminin azaltılması ve sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ancak, bu stratejilerin uygulanması sırasında karşılaşılan engeller, özellikle küçük işletmeler için önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Ülkemizde ve dünyada gıda sektöründe izlenebilirlik ve Endüstri 4.0 uygulamalarının, gıda tedarik zinciri içerisinde izlenebilirlik amaçlı kullanımına yönelik yapılan çalışma sayısı her geçen gün artmaktadır. Gıda üretiminin tedarik zinciri sektörü içerisinde gerçekleşmesi ve izlenebilirlikte Endüstri 4.0 teknolojilerinden yararlanılması çalışmaların, gıda mühendisliğinin yanı sıra endüstri mühendisliği, işletme, bilgisayar mühendisliği vb. bir çok farklı bilimsel disiplin alanında da araştırma konusu olmasını sağlamıştır. Bu nedenle konu farklı disiplinlerden çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu durum konunun multidisipliner bir yaklaşımla ele alınması gerektiğinin de önemli bir göstergesidir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde gerçekleştirilen araştırmaların çeşitli yönlerden ele alındığı ve irdelendiği görülmektedir. Bu nedenle çeşitli yönleri ile araştırılan konu hakkında gerçekleştirilen araştırmaların bir kısmı temel Endüstri 4.0 teknolojilerinin çalışma prensiplerinden yola çıkarak bunların gıda sektöründeki uygulamalarını irdeleyen çalışmalar olmak ile birlikte, diğer bir kısmı ise gıda sektöründe izlenebilirlik teknoloji önerileri ve modellerine yönelik çalışmalardır. Sonuç olarak, Endüstri 4.0'ın gıda sektöründe sağladığı fırsatlar kadar, karşılaşılan eksiklikler ve zorluklar da dikkate alınmalıdır. Gıda sektöründeki dijital dönüşüm yalnızca, teknolojik yeniliklerin benimsenmesi ile değil, aynı zamanda bu yeniliklerin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için gerekli olan altyapı ve eğitimle de doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, gıda sektöründe Endüstri 4.0 uygulamalarının başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için, hem teknolojik hem de insan kaynakları açısından kapsamlı bir yaklaşım benimsenmesi gerekmektedir.

Endüstriyel Devrim Aşamaları

Birinci Endüstri Devrimi (Endüstri 1.0)

Birinci Endüstri Devrimi dönemi (Endüstri 1.0), 18. yy'ın sonlarına doğru (1760'dan 1840'a kadar) ortaya çıkan ve buhar gücünün kullanımı ile üretimde mekanik sistemlerin kullanılmaya başlandığı dönemi ifade etmektedir. Bu dönem ile birlikte o zamana kadar el emeği ile gerçekleştirilen üretim yerini mekanik üretime bırakmış ve toplumsal iş gücünü tarımdan sanayiye yönlendirmiştir. Bu dönemde emeğin yani insan ve hayvan gücünün yerini makineler almaya başlamış tarım, madencilik, imalat ve ulaştırma gibi sektörlerde ise olumlu gelişmeler devam etmiştir (Apriliyanti, 2022; Dai ve ark., 2024; Kılıç, 2023; Raschke, 2022). Endüstri Devriminde makineleşme yoluyla, tahılların öğütülmesi 18. yy'da insan, hayvan, rüzgâr veya su gücüyle çalışan sistemlerden buharla çalışan makinelere geçişi sağlamıştır. Bu sayede, gıda üretiminde tekrarlayan görevlerin yerine getirilmesi için buhar makinesinin kullanılması ve özellikle ısı işlem (pastörizasyon ve sterilizasyon) gibi buhar gücüne dayalı üretim süreçlerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir (Ane & Yasmin, 2019; Hassoun ve ark., 2023a).

Endüstri 1.0'ın en önemli etkilerinden biri, dünyanın ilk modern kooperatifi olan Rochdale'deki İngiliz kooperatifinin ortaya çıkmasıdır (Wardhiani ve ark., 2023).

İkinci Endüstri Devrimi (Endüstri 2.0)

Endüstri 2.0, "bilimsel yönetim" veya Taylorizmin işbölümünü, montaj hatlarını ve elektrik enerjisi makinelerinin kullanımını tanıttığı 1870' ten sonraki döneme karşılık gelir (Belaud ve ark., 2019). Bu dönem elektriğin sanayide kullanılmasıyla kitlesel seri üretimin gerçekleşmeye başladığı dönemdir. Bu dönemde fizik, kimya gibi fen bilimleri alanındaki teknik gelişmelerin teknolojiye kullanılması ile 1. Endüstri Devrimi'ne göre daha gelişmiş, kompleks aletler ortaya konmuştur. Örneğin, 1. Endüstri Devrimi'nde basit prensiplerle çalışan makinelerden (kasnakların kullanımı gibi) bu dönemde daha ileri teknolojinin kullanımıyla daha üstün performans elde edilmiştir. Diğer yandan ulaşım ve iletişim araçlarında görülen önemli gelişmeler sonucunda telgraf, demiryolu, kablo sistemleri, buharlı gemi gibi icatların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Biçerdöver, dikiş makinesi, yüksek kapasiteli konserva ve paketleme aletleri bu dönemde icat edilen başlıca aletlerden bir kaçıdır (Berkaş & Oraklıbel, 2021; Lezoche ve ark., 2020; Pilevari, 2020).

Bu dönemden itibaren gıda sektörüne özgü makinelerin icadında önemli gelişmeler görülmüştür. 1930'lu yıllarda Norman Walker tarafından icat edilen meyva suyu ekstraksiyon makinesi, 1960'lı yıllarda Karl Busch tarafından icat edilen vakum paketleme sistemleri, parça pastörizasyon sistemlerinden sürekli pastörizasyon sistemlerine geçiş bu dönemin gıda sektöründeki önemli gelişmelerdendir (Hassoun ve ark., 2023a).

Üçüncü Endüstri Devrimi (Endüstri 3.0)

Elektronik, bilgi işlem ve robotik üretimin gelişmesiyle 20. yy, kalite ve maliyet performanslarına odaklanan endüstri 3.0 dönemi başlamıştır. Otomasyon, daha esnek, ergonomik ve daha güvenli makinelerin tasarımı yoluyla

üretim süreçlerini optimize etme ve üretkenliği artırma fırsatları sağlamıştır (Belaud ve ark., 2019).

Bu dönemde bilgi teknolojilerinin ve elektronik sistemlerin gelişimiyle üretim iyice otomatikleşmiş ve dünya dijitalleşmeye başlamıştır. İlk mikro bilgisayarların kullanımı ve Apple'ın kurulması 3. Endüstri Devriminin önemli olaylarından biridir. Bu dönem ile birlikte endüstriyel işlemler büyük ölçüde bilgisayarlar aracılığıyla gerçekleştirilmeye ve 'saha çalışanı' sayısı azalmaya başlamıştır (Berktaş & Oraklıbel, 2021). 3. Endüstri Devriminde (1970'li yıllarda), mikroçiplerin geliştirilmesiyle proseslerin dijitalleştirilmesi sağlanarak gıda işleme hatalarının daha iyi kontrol edilebilmesi sağlanmıştır. Bu dönemde bilgisayar (programlanabilir ve otomatik özelliklere sahip) ve yeni ekipmanlarla sürekli ve daha kapsamlı işleme mümkün hale gelmiştir. Ayrıca robotlar ilk olarak gıda işlemede bu dönemde kullanılmıştır (yaklaşık 1990). Üçüncü endüstri devriminde aynı zamanda bitki ve baharatların mikrobiyal dekontaminasyonu için ışınlama (iyonlaştırıcı ve mikrodalga sistemleri) sistemlerinin geliştirilmesini sağlayan ilerlemeler de dikkat çekmiştir (Farkas & Mohácsi-Farkas, 2011; Hassoun ve ark., 2023a; Nayik ve ark., 2015).

Dördüncü Endüstri Devrimi (Endüstri 4.0)

Dördüncü sanayi devrimi olarak adlandırılan Endüstri 4.0, üretim sistemlerinin daha akıllı, özerk ve otomatik hale gelmesini sağlamıştır. Bu dönüşüm, bilgi ve iletişim teknolojilerinin olağanüstü değişimi ile karakterize edilmektedir. Geleneksel iş modellerinin yerini dijitalleşmeye dayalı yeni yaklaşımlar alırken, bu değişim yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda tedarik zincirlerini ve toplumsal etkileşimleri de etkilemektedir (Gedik, 2021). Bilgisayarlar ve internet aracılığıyla makinelerin koordine edilerek üretim süreçlerinin otomatik olarak gerçekleştirilebildiği ve insan gücünün yerini makine/elektronik gücün almaya başladığı dönem olarak ifade edilebilir (Doğan, 2022; Hassoun ve ark., 2023a).

Endüstri 4.0'a uyum sağlamak, ülkeler ve işletmeler için hayati bir gereklilik haline gelmiştir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, bu uyum sürecinin nasıl gerçekleştirileceği ve hangi stratejilerin benimsenmesi gerektiği üzerine çeşitli öneriler geliştirilmiştir. Endüstri 4.0'ın temel bileşenleri arasında; siber-fiziksel sistemler, IoT, büyük veri, bulut teknolojileri ve otonom robotlar yer almaktadır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmakta ve işletmelere rekabet sağlaması bakımından önemlidir (Akben & Avşar, 2018).

Veri toplama ve analiz süreçlerinin iyileştirilmesi ile Endüstri 4.0 gıda israfının azaltılmasını, verimlilik ve gıda kalitesinin artırılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım ile gıda üretiminde şeffaflık ve izlenebilirlik sağlanmış olmaktadır. Gıda endüstrisinin şeffaflığını sağlayabilmek için izlenebilirlik ilkeleri kullanılmaktadır. İzlenebilirlik sistemleri, gıda şirketlerinin karmaşık tedarik zincirlerinde hareket etmelerine yardımcı olmakta ve tüketicilere anlaşılır bilgiler sunarak gıda israfını azaltma stratejileri geliştirmektedir (Chapman ve ark., 2022; Corallo ve ark., 2020; Hassoun ve ark., 2023a; Sadeghi ve ark., 2022).

Endüstri 4.0 ile diğer teknolojilere veya internete bağlı cihazlar ile tüm verilere erişim kolaylaşır. Ayrıca üretim alanındaki etkinlik sağlanırken makine teknolojisi insan

yerine kullanılır, böylece üretim maliyetleri düşürülür. Kısa sürede, iyi kalitede ürün üretildiği için ulusal gelir artar ve bu teknolojiyi kullanmak için uzman insanlara ihtiyaç duyulur. Bu olumlu yönlerinin yanında Endüstri 4.0'de üretim sürecinde teknolojik makineler kullanıldığı için siber saldırılara karşı savunmasız olabilmesi, ekipman ve işçilere (eğitim verilmesi) büyük yatırım gerekmesi gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır (Wardhiani ve ark., 2023).

Gıdada İzlenebilirlik ve Gıda İzlenebilirliğinde Endüstri 4.0 Uygulamaları

Gıda izlenebilirliği, Endüstri 4.0 çağında gıdaları bu yeni devrimi yansıtan teknikler ve teknolojilerle izlemekle ilgilidir (Hassoun ve ark., 2024a). Gıda izlenebilirliği; gıdanın kökeni, gıda bileşenleri, işlenmesi, taşınması ve depolanması koşullarıyla ilgili tüm bilgileri içerir ve gıda izlenebilirliğinin perakendecilere olası güvenlik ve tehlikelere anında yanıt verme fırsatı verebileceğini gösterir (Tao & Chao, 2024). İzlenebilirlik, gıda ürünleri ve bileşenlerinin birincil üretiminden işleme, dağıtım ve satışına, oradan da tüketiciye ulaşmasına kadar olan tüm aşamaları kapsayan, bu süreçteki belgeleme ve bağlantıların bir bütün olarak insan sağlığı için en yüksek düzeyde güvence ve kaliteyi sağlamayı amaçladığı bir süreçtir (Hassoun ve ark., 2024a; Yaralı, 2019).

Gıda sektöründe izlenebilirliğin sağlanabilmesi ve verimli bir şekilde sürdürülebilmesi ise etkin bir izlenebilirlik sisteminin kurulmasına bağlıdır. Gıda izlenebilirlik sistemleri, gıda üretim zincirindeki girdi ve ürünlerin hareketini yönetmede gıda endüstrisinin destekleyen önemli araçlardır (Matloob ve ark., 2024). İzlenebilirlik sistemleri; ürünlerin takibinin yanı sıra tedarik zincirindeki paydaşlar için ürünlerin özellikleri, içeriği, geçmişi ve hareketleri ile bunların diğer ürünlerle olan ilişkileri hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Scholten ve ark., 2016; Van der Vorst ve ark., 2005).

Gıda proteinlerinin (özellikle kas orjinli) yüksek bozulabilirlik riski ve kısıtlı raf ömrü ile ilgili sorunlar, çevresel zorluklar ve ekonomi prensipleriyle desteklenen yüksek kaliteli ve sürdürülebilir üretime yönelik tüketici talebini karşılamak üzere farklı yenilikçi işleme ve koruma teknikleri ile analitik metodolojik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu gelişme, 2015'ten bu yana ivme kazanan ve bir dizi otomatik ve dijitalleştirilmiş teknolojiyle ortaya çıkan Endüstri 4.0 devam eden çağda geliştirilmiş ve artırılmıştır. Endüstri 4.0 teknolojilerine ve yüksek otomasyon ve dijitalleştirme oranlarıyla akıllı üretim elde etmedeki rollerine özel dikkat gösterilmiştir. Darbeli elektrik alanı, yüksek basınç işleme, ohmik ısıtma, nanoteknoloji, gelişmiş kütle spektrometrisi ve hiperspektral görüntüleme sensörleri gibi ortaya çıkan teknolojiler, mevcut gıda devrimi 4.0'ın temel unsurları arasındadır. Endüstri 4.0 sayısız olasılık sağlasa da, tam potansiyelini yakalamak ve mevcut zorlukları çözmek ve Endüstri 5.0'e doğru ilerlemek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Hassoun ve ark., 2024b).

Gıda İzlenebilirliği; gıdanın özgünlüğünü, güvenliğini ve yüksek gıda kalitesini garanti altına almak amacıyla Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanmasını ifade eder (Hassoun ve ark., 2023b). Günümüzde yapay zeka, büyük veri, akıllı sensörler, 3D gıda baskısı, nesnelerin interneti,

blokzincir ve bulut bilişim gibi Endüstri 4.0'ün temel teknolojileri gıda sektöründe gıda kalitesi, güvenliği, izlenebilirliği ve sürdürülebilirliği vb. lerini sağlamak amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstri 4.0'ün bu uygulamaları dijital, fiziksel ve biyolojik gıda bilimlerinin birleşimiyle karakterize edilmektedir (Hassoun & Bigliardi, 2024). Endüstri 4.0 çağındaki dijital teknolojiler, gıdanın izlenme şeklini iyileştirme, gıda israfını azaltma ve dolandırıcılığa karşı hassasiyeti azaltma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir ve daha akıllı gıda izlenebilirliği elde etmek için yeni fırsatlar sunmaktadır (Hassoun ve ark., 2023b). Akıllı gıda izlenebilirliğinin, gıda omikleriyle (yani gıdaların besin değerlerini, kalitesini ve özgünlüğünü ve ayrıca güvenliğini ve emniyetini kapsayan gıda parmak izi) ilgili küresel zorlukların üstesinden gelmeye önemli ölçüde yardımcı olduğu bilinmektedir (Meliana ve ark., 2024).

Tanımlama ve İzleme Teknolojileri:

İlk Evrensel Ürün Kodu barkodları; 1970'lerde uygulamaya girmiştir. Makine tarafından okunabilen optik etiketler, okuyucular ve standartlardan oluşmaktadır. Düşük maliyetleri ve kullanım kolaylıkları nedeniyle barkodlar, kolay envanter kontrolü, yeniden stok siparişi ve ödemeyi kolaylaştırmak için büyük ölçekli perakende ticaretinde ve mağazalarda giderek daha fazla kullanılmıştır. İlk önce tek boyutlu (1D) barkodlar geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen iki boyutlu (2D) barkodlar, tek barkodlara kıyasla daha fazla miktarda bilginin depolanmasına olanak sağlamıştır (Ghaani ve ark., 2016).

DNA barkodlama, 2008'den beri tıbbi bitkilere uygulanan yeni bir moleküler tanımlama ve sınıflandırma teknolojisidir. Bu tekniğin uygulanması, tıbbi malzemelerin güvenliğini ve etkinliğini büyük ölçüde sağlamıştır (De Mattia ve ark., 2011; Yu ve ark., 2021). "DNA barkodlama" kavramı, bitki tanımlamasıyla ilgili birçok sorun için kapsamlı bir çözüm bulmuş ve bitkisel endüstriyi, biyolojik çeşitlilik sınıflandırmasını ve hatta taksonominin yeniden doğuşunu olumlu yönde etkilemiştir (Mahima ve ark., 2022). DNA barkodlama, biyolojik örnekleri tanımlayabilen ve hem ham maddelerin hem de işlenmiş gıdaların tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan moleküler tabanlı bir sistemdir. Gıdaların orijinalliklerinin doğrulanması çoğunlukla proteinlerin ve/veya DNA dizilerinin analizine dayanmaktadır (Galimberti ve ark., 2013). İzlenebilirliği ve etiketleme doğruluğunu araştırmak amacıyla yapılan bir çalışmada Tayland'da satılan toplam 54 balık fileto ürünlerinin türlerini belirlemek için bir DNA barkodlama sistemi kullanılmıştır (Panprommin & Manosri Citation, 2022). ABD ticari pazarında satılan çeşitli kıyım ürünlerinde olası yanlış etiketlemelerin varlığını test etmek için ayrıca sızma zeytinyağlarının özgünlüğünü, izlenebilirliğini ve sahteciliğini incelemek amacıyla DNA barkodlama kullanılmaktadır (Ben Ayed ve ark., 2022).

Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID); dost veya düşman askeri uçaklarının tanımlanması için ikinci dünya savaşı (1939-1945) sırasında ortaya çıkmıştır. Tanımlama alanındaki en önemli teknolojilerden biri olan RFID, özellikle radyo frekanslı dalgaları aracılığıyla, bir nesneye takılı bir etiket ile bir sorgulayıcı arasındaki kablosuz

iletişime dayanmaktadır. Bu sistem, barkodlar gibi diğer tanımlama sistemlerine kıyasla ürün tanımlama için daha uygundur. RFID etiketleri görsel temas gerektirmediği için kutulara, kaplara yerleştirilebilir, hayvanlara enjekte edilebilir ve pasaportlar gibi herhangi bir nesnede kullanılabilirler (Bibi ve ark., 2017). Özellikle çeşitli tedarik zincirlerinde nesnelere izlemek ve takip etmek için izlenebilirlik sistemlerinde kullanılabilen iyi bilinen ve yaygın olarak benimsenen otomatik bir tanımlama teknolojisidir. Ayrıca bozulabilir ürünler için gerçek zamanlı izleme ve karar destek sistemi için başarıyla uygulanmıştır (Alfian ve ark., 2017; Mehannaoui ve ark., 2023). RFID etiketleri, veri taşıyıcı bir cihazın en gelişmiş örneğidir ve küçük bir antene bağlı bir mikroçip tarafından oluşturulan bir etiket; radyo sinyalleri yayan ve karşılığında etiketten yanıtlar alan bir okuyucu; ve RFID donanımı ile kurumsal uygulamaları birbirine bağlayan bir ara yazılım (yerel ağ, web sunucusu, vb.) olmak üzere üç ana öğeden oluşur (Ghaani ve ark., 2016). Endüstri 4.0' da, tedarik zincirinin gerçek zamanlı görünürliğini, kontrolünü ve çeşitli üretim süreçlerinin otomasyonunu sağlamak amacıyla bu teknolojiye yararlanılmaktadır (Soori ve ark., 2024).

Endüstri 4.0'ın bir diğer kritik bileşeni akıllı sensörlerdir. Düşük maliyet ve güç kullanımı, taşınabilirlik, kendini tanımlama ve kalibrasyon gibi çeşitli özellikler akıllı sensörleri karakterize etmektedir. Günümüzde, tarımda ve gıda endüstrisinde farklı tipte optik (kolorimetrik, flüorometrik...) ve elektrokimyasal (potansiyometrik, amperometrik ve kondüktometrik) sensörler/biyosensörler ve göstergeler yaygın olarak kullanılmaktadır (Hassoun ve ark., 2024c). Biyosensördeki sensör, biyometrik sinyalin, biyosensörlerin akıllı teknolojilerle etkileşime girmesini sağlamak için kritik öneme sahip olan niceliksel bir elektrik formülüne dönüştürür. Bu durum Gıda Güvenliği 4.0'ün veri odaklı çözümlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Akıllı sensörler saha testlerinde önemli bir rol oynar ve biyosensör okumalarının doğruluğu ve güvenilirliğini sağlamak için düzenli kalibrasyon ve bakım yapılması gerekmektedir. Bakım ve optimum biyosensör performansını sürdürmek için kalifiye personel gerekmektedir (Chen ve ark., 2024).

Kablosuz Sensör Ağı (WSN); sabit veya mobil çok sayıda küçük sensör düğümünden oluşan ve bu düğümler arasında kablosuz iletişime sahip bir ağıdır ve tedarik zincirindeki kritik gıda parametrelerinin gerçek zamanlı izlenmesi için kullanılır (Alfian ve ark., 2017; Mehannaoui & Mouss, 2019; Mehannaoui ve ark., 2023). Tedarik zincirinde bozulabilir gıda ürünlerinin kalitesinin izlenmesi için kablosuz sensör ağlarının sıcaklık izleme amacıyla kullanılması büyük önem taşımaktadır (Alfian ve ark., 2017).

Veri Yönetim Teknolojileri:

Veri Yönetimi Teknolojileri, veri analizi, entegrasyonu, depolama, paylaşım ve güvenliği içerir. Bunlar:

a) *Bulut bilişim*; çok sayıda sunucu makinesinin dijital bir ağ üzerinden, bütünlük bir sistem olarak uyumlu bir şekilde çalışmasını ifade eder. 'Bulut', kullanıcıların talep üzerine erişebildiği, asgari yönetim müdahalesine sahip

ağlar, sunucular, uygulamalar, depolama alanları ve hizmetlerden oluşan sanallaştırılmış bir ortamdır (Sapkal & Kusi, 2024). Bulut hizmetleri, internet üzerinden yüksek bilişim kullanımına izin vermektedir. Bulut çözümleri ön maliyet gerektirmediği için şirketler çok fazla para harcamadan, gelişmiş bilişim kullanabilirler ve bu da yeni kurulan şirketlerin artmasını sağlamaktadır. Bulut bilişim, büyük, tek seferlik harcamaları daha küçük, düzenli maliyetlere dönüştürerek daha uygun fiyatlı hale getirmektedir. Bu durum da, küçük ve orta ölçekli işletmelerin daha önce karşılayamadıkları gelişmiş teknolojiyi kullanmalarına olanak tanımaktadır (Mistry ve ark., 2024).

b) *Blok Zincir*: Blok Zincir, verilerin dijital ortamda tarih sırasına göre birbirine zincir gibi bağlı bloklar şeklinde işlendiği ve saklandığı bir tür kayıt defteri olarak tanımlanmaktadır. Blok Zincirde kaydedilen veriler, her işlem sırasında birbirleriyle hash adı verilen çeşitli algoritmalar yardımıyla ilişkilendirildiğinden dışarıdan müdahale ile değiştirilmesi zordur. Bu nedenle taraflar için oldukça güvenilir ve şeffaf bilgiler sağlamaktadır (Sri Vigna Hema & Manickavasagan, 2024; Yu ve ark., 2024). Blok zincir, gıda izlenebilirliğinde tüketicinin bilgilendirilmesinin yanı sıra gıda sektörüne ilişkin araştırmalar için önemli bir veri tabanı sunabilen teknolojidir (Gerdan ve ark., 2020). Gıda sektöründe Blok Zincir teknolojisinin ana uygulama alanı, tedarik zincirindeki izlenebilirlik sistemiyle ilgilidir ancak bununla birlikte, çiftlikten sofraya gıda tedarik zinciri yönetim sisteminde gıda usulsüzlüklerinin izlenmesi ve saptanması ve gıda güvenliğinin doğrulanması için de önemli bilgiler sağlayabilir. Bu durum mevcut sistemlerin güvenilirliğini sorgulanır hale getirmektedir. Blok Zincir uygulaması ürünün seri numarası, üretim yeri ve tarihi, gıda güvenliği sertifikasyonu, üretim sahasının gerçek zamanlı hijyenik ve sağlığa uygunluk durumu gibi ürün verilerinin zamanında ve tahrifata uğramamış bir şekilde paylaşılması yoluyla gıda güvenliğini sağlamakta ve alıcının güvenini etkili bir şekilde teşvik etmektedir. Bilindiği üzere gıda tedarik zincirinde gıda ürünleri üretim, işleme, nakliye, dağıtım ve perakende işlemlerinden tüketiciye ulaşmaya kadar birçok aşamadan geçmektedir (Tripoli & Schmidhuber, 2020; Patel ve ark., 2023). Blok zincir, güvenilir izlenebilirlik sistemlerini etkinleştirerek özgün, kaliteli ve güvenli gıdayı garanti eder; aynı zamanda gıda tedarik zinciri risklerini azaltır ve taleplerin daha iyi tahmin edilmesini sağlar (Hassoun ve ark., 2023b).

c) *Büyük Veri*: Büyük Veri terimi, geleneksel bilgisayar teknolojisinin potansiyellerini aşan ve karmaşık veri analiz araçları komplekslerinin yardımıyla çıkarılması gereken yönetim ve analiz teknolojilerinin devasa bilgilerini ifade eder (Mehannaoui ve ark., 2023). Orijinal verilerdeki değer bilgisinin keşfi, veri kümelerinin potansiyel değerinin çıkarılabileceği “ayrık veriler - entegre veriler - bilgi anlayışı - mekanizma çıkarma - uygulama etkisi analizi” döngüsünden geçmektedir. Gıda endüstrisindeki büyük veri uygulamasının işleme sistemi; büyük veri toplama, büyük veri işleme ve birleştirme, büyük veri madenciliği ve analizi, büyük veri görüntüleme ve büyük veri güvenliği olmak üzere beş modülden oluşmaktadır (Tao ve ark., 2021). Büyük Veri, şirketlerin sattıkları ürünlerde orijinalliği ve gıda sahtekarlığını tespit etmesini sağlamada önemli bir rol oynamaktadır (Pollard ve ark., 2019). Ayrıca

geniş çapta ve etkili bilgi sunarak karar verme süreçlerini geliştirir, gıda güvenliği ve kalitesini artırır (Hassoun ve ark., 2023b).

d) *Yapay Zekâ*: Gıda izlenebilirlik sistemlerindeki yapay zekâ, kalite güvencesinde şeffaflık sağlar. Yapay zekâ ve IoT büyük verilerini kullanarak, gıda güvenliği izlenebilirlik sistemleri, yetersiz güvenilirlik ve karmaşık veri depolama gibi geleneksel izlenebilirlik sistemleriyle bağlantılı sorunları etkili bir şekilde çözebilir (Chhetri, 2024). Bu bağlantı, gıda maddelerinin soyunun sorunsuz bir şekilde izlenmesini kolaylaştırır ve gıda güvenliği ve kalitesiyle ilgili verilerin netliğini ve güvenilirliğini iyileştirmek için yöntemler sunar. Uzmanlar, gıda endüstrisine yapay zeka tekniklerinin dahil edilmesinin, gıda ürünlerinin kalitesinin değerlendirilmesine yardımcı olabileceğini ve doğru ve tutarlı değerlendirmeler için fırsat sağlayabileceğini önermektedirler (Wei ve ark., 2023; Ikram ve ark., 2024). Ayrıca otomasyon ve dijitalleşmenin gelişimini destekler, verimliliği artırır ve israfı azaltır (Hassoun ve ark., 2023b).

e) *Nesnelerin İnterneti (IoT)*: IoT, ortak bir platformdaki sensörleri kullanarak çevreleri ve faaliyetleri hakkında veri toplayan ve paylaşan, birbirine bağlı cihazlardan oluşan geniş bir ağı ifade etmektedir. Ağda bulunan cihaz ve platformların bağlantısı internet aracılığıyla gerçekleşmektedir. IoT uygulaması, gıda tedarik zinciri yönetiminde tarım ve taşımacılık için kullanılan ekipman ve cihazların kontrol edilmesi, talep ve üretimin tahmin edilmesi, ürün ve ekipman akışının izlenmesinin yanında; çevreyi, mahsulü, gübreyi, hava durumunu, su yönetimini ve verimliliğini izlemek gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Khan ve ark., 2023). Ayrıca pestisitlerin tespit edilmesini ve gıda güvenliğini sağlarken, olgunlaşma ve diğer kalite özelliklerini tahmin ederek gıda standartlarına uygunluğu temin eder (Hassoun ve ark., 2023b).

IoT'un amacı; gerçek zamanlı olarak veya gelecekte daha iyi kararlar almak amacıyla algılama ve tanımlama yoluyla verilerin toplanmasından, analiz edilmesi, işlenmesi ve depolanmasına kadar tüm işlemlerin gerçekleştirilmesi için çeşitli ve farklı akıllı cihazları insan müdahalesi olmadan birbirine bağlamaktır. Gıda izlenebilirliğinde IoT tabanlı teknolojileri; tanımlama ve izleme, iletişim ve veri yönetim teknolojileri olarak gruplandırabiliriz (Mehannaoui ve ark., 2023).

f) *Robotik Sistemler*; endüstride çeşitli görevleri yerine getirmek için kullanılan yenilikçi bir teknolojidir. Robotik, doğru uygulandığında bir şirketin faaliyetlerinde olumlu yönde değişim sağlar. Normal iş akışını olumlu etkiler, genel montaj iş akışını kolaylaştırır ve yiyecek üretmek için robotik sistemlerden yararlanır (Javaid ve ark., 2021).

g) *3 Boyutlu Baskı (3D) Teknolojisi*: 3 boyutlu nesnenin ilk parçası 1983 yılında 3 boyutlu baskıyı icat eden Chuck Hull tarafından basılmıştır (Yang ve ark., 2017). 3 boyutlu baskı, katmanlı üretim ve hızlı prototipleme olarak da adlandırılan tıp, gastronomi, mühendislik, imalat, sanat ve eğitim gibi sürekli büyüyen uygulama alanlarıyla araştırmacılar, endüstri ve kamuoyunun ilgisini çeken, günlük tartışmalara konu olan dijital bir teknolojidir (Dankar ve ark., 2018). Gıda sektöründe 3D baskı teknolojisinin uygulanması, birçok potansiyel avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar arasında özelleştirilmiş gıda

tasarımları, kişiselleştirilmiş ve dijitalleştirilmiş beslenme, tedarik zincirinin basitleştirilmesi ve mevcut gıda malzemelerinin kaynağının genişletilmesi yer almaktadır. 3D gıda baskısı, geleneksel yöntemlerle elde edilmesi zor olan karmaşık ve yaratıcı gıda tasarımlarının üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji, aşçılar, beslenme uzmanları ve gıda tasarımcılarının mutfak bilgisi ve sanatsal becerilerini kullanarak, önceden belirlenmiş veri dosyalarına dayalı olarak herkes tarafından da kullanılabilir hale gelmektedir (Liu ve ark., 2017).

Endüstri 4.0 ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Pal ve Kant (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, IoT tabanlı mekanizmaların, taze gıda tedarik zincirinde merkezi veri toplama ve analitiği ile önemli iyileştirmeler sağlayabileceği ifade edilmiştir. Ancak, bu tür teknolojilerin entegrasyonu, mevcut sistemlerin uyumlu hale getirilmesi ve çalışanların bu yeni sistemlere adapte olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Pal & Kant, 2018). Esmer ve Melikoğlu (2015), yapmış oldukları araştırma ile RFID teknolojisinin çalışma prensibine değinerek gıda sektöründeki uygulama alanlarını araştırmışlar ve gıda tedarik zinciri yönetimi, gıda sıcaklık ve tazeliliğinin izlenmesinde kullanımına yönelik RFID tabanlı akıllı etiketlere ait deneysel ve endüstriyel çalışmaları değerlendirmişlerdir. Ediz (2021), gıdada izlenebilirliği basit ve kolay bir şekilde sağlamak amacıyla gıda şirketlerinde ortak kullanılacak bir algoritma ve veri tabanı önermiştir. Yıldızbası ve Üstünyer (2019), blok zincir teknolojisinin temel prensiplerini ve bu teknolojiye tedarik zincirinde nasıl yararlanılabileceğini irdelemişlerdir. Araştırmacılar blok zincir teknolojisini tedarik zinciri yönetim sürecine entegre ederek, önerdikleri model ile ülkemizde mevcut hal yasası uygulamaları kapsamında gerçekleştirilen gıda ürünleri tedarik zincirinin, üçüncü bir tarafa ihtiyaç duyulmadan üretici ve tüketici arasında gerçekleştirilebileceği ve gıdada izlenebilirliğin sağlanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Keleş ve Ova (2020), yapmış oldukları araştırmada kurumsal kaynak planlaması, RFID, IoT ve blok zincir bilgi teknolojileri sistemlerini ve bunların bunların gıda sektöründe uygulamalarını irdelemişlerdir. Xu ve ark. (2020), tarımsal gıdalar için blok zincir uygulamalarını gıdada izlenebilirliği, güvenliği, kalitesi ve şeffaflığı açısından incelemişlerdir. Araştırmada blok zincir teknolojisinin çalışma prensiplerinden bahsederek blok zincirin gıda izlenebilirliğinde kullanılabilirliğini göstermek için bir şirket üzerinde vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak; blok zincirin tarımsal gıda sektörü için izlenebilirlik açısından umut verici çözümler ortaya koyduğu ve bazı tarımsal ürünler için hem teknik hem de düzenleyici olmak üzere birçok zorluğun çözülmesi gerektiği belirtilmiştir.

Cebeci ve Arat (2022), blok zincir teknolojisinin tarım ve gıda tedarik zincirine entegre edilmesinin artı yönlerini ve bu teknolojiye nasıl yararlanılabileceğini araştırmışlar ve gelecekteki kullanım etkisini tartışmışlardır. İndap (2022), blok zincir teknolojisinin tarım-gıda tedarik zincirinde izlenebilirlik, şeffaflık, gıda güvenliği, kaybı ve sürdürülebilirlik sorunlarını çözmedeki rolünü ve kullanılabilirliğini araştırmıştır. Araştırmacı çalışmada blok zincir teknolojisinin tarım ve gıda tedarik sektöründeki kullanımı üzerine paydaşların farkındalığını

araştırmış ve sektörün dijital yatırım önceliklerini belirlemeye çalışmış ve tedarik zincirinde nasıl bir süreç modeli ile uygulanabileceğini incelemiştir. Çalışmada geliştirilen analitik çerçeve ve bulguların farklı sektörlere ve tarım-gıda tedarik zincirlerinin farklı alt sektörlerine uyarlanabilir nitelikte olduğunu belirtmiştir. Rejeb ve ark., (2022), büyük veri uygulamalarının gıda sektöründeki kullanılabilirliğini belirlemek için literatürdeki akademik araştırmaları sistematik bir şekilde incelemişlerdir ve sağlayabileceği yararları değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, büyük veri teknolojisinin gıda güvenliği için önemli faydalar sağlayabileceğini belirterek, ileride gerçekleştirilecek çalışmalara ilişkin önerilerde bulunmuşlardır. Yakubu ve ark. (2022), pirinç tedarik zincirinde blok zincir teknolojisinden yararlanarak tüketicilerin memnuniyet geri bildirimlerini içeren ve pirinç sektöründeki tüm paydaşlar tarafından gerçekleştirilen işlem ve etkileşimlerin takip edilebildiği bir model önermişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneysel analiz sonucu; modelin güvenlik, maliyet verimliliği ve ölçeklenebilirlik açısından literatürdeki benzer yöntemlerden daha iyi bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Kutyauro ve ark. (2023), tarımsal gıda sektöründe yapay zekâ tabanlı yöntemlerin uygulamalarını incelemişlerdir. Araştırmacılar literatürdeki çalışmalarını gıda tedarik süreçleri açısından sistematik bir şekilde analiz ederek, çeşitli yapay zekâ algoritmalarının gıda tedarik zincirinin tüm aşamalarında uygulanabilir olduğunu ifade etmişlerdir. Sentürk ve ark. (2023), IoT tabanlı sistemlerin temel uygulamalarını ve bu teknolojinin tarım ve gıda tedarik zinciri yönetimi vb. alanlardaki başarılı uygulama örneklerini inceleyerek son gelişmeleri değerlendirmişlerdir. Cömert ve ark. (2024), blokzincir teknolojisinin gıda tedarik zincirindeki kullanımını ve faydalarını araştırmak amacıyla ülkemizde blokzincir teknolojisini kullanan bir şirket üzerinde örnek olay incelemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında nitel araştırma vaka çalışması tasarımı kullanılarak İstanbul ve İzmir'den uzman katılımcılara gıda tedarik sürecinde blokzincir uygulamalarını da içeren önceden tasarlanan temalar hakkındaki görüşleri sorulmuş, ve toplanan verilerin betimsel analizleri yapılmıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda blok zincir teknolojisinin şeffaflık ve izlenebilirlik prensiplerinin, tüketiciler ve tedarik zinciri paydaşları üzerinde olumlu etkiler ortaya çıkardığını ve gıda tedarik süreçlerinde kullanımının yaygınlaştırılması gereken verimli bir sistem olduğuna işaret etmişlerdir. Hassoun ve ark. (2024b), yeni bir araştırma konusu olarak gıda izlenebilirliği 4.0 kavramından bahsederek Endüstri 4.0 teknolojilerinin gıda izlenebilirliğindeki kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada blok zincir, nesnelerin interneti, yapay zekâ ve büyük veri uygulamalarının gıda izlenebilirliğini sağlamada ve gıda israfı ile sahtekârlığını önlemede bu teknolojilerin önündeki mevcut engellere rağmen gelecekte bu uygulamaların geliştirilmesiyle birlikte önemli fırsatlar sunabileceği ileri sürülmüştür. İkrâm ve ark. (2024), yapay zekâ uygulamalarının gıda sektöründe kullanımını, avantajlarını ve dezavantajlarını değerlendirerek yapay zekânın gıda güvenliğini sağlamadaki potansiyelini araştırmışlardır. Araştırmacılar, yapay zekâ uygulamalarının gıda sektörü için izlenebilirlikte de karmaşık sorunların çözümünde önemli bir rol oynayabileceğini belirterek yapay zekâdan gıda

sektöründe daha fazla yararlanmaya yönelik çalışma sayısının artırılması gerektiğine işaret etmişlerdir. Ghag ve ark. (2024), yapay zekanın gıda tedarik zincirine entegre edilmesinin önündeki mevcut engelleri literatürün analizi ile araştırarak bu engelleri kategorilere ayırmışlardır. Araştırmacılar sorunun çözümü için yeni bir yöntemsel yaklaşım önerisinde bulunmuştur. Ekstrüzyona dayalı baskı kullanarak kek kreması, işlenmiş peynir ve şekerli kurabiyelerin üretiminin incelendiği bir çalışmada gıda ürünlerinin 3D baskı ile nasıl özelleştirilebileceğini ve bu süreçte kullanılan malzemelerin özelliklerinin önemini ortaya konmuştur. Çalışma sonucuna göre, kek kreması gibi yumuşak gıda maddelerinin baskı sürecinde, malzemenin viskozitesi ve akışkanlık özellikleri, baskı işleminin başarısını etkileyen temel faktörler arasında yer aldığı ifade edilmiştir (Hussain ve ark., 2021).

Sonuç

Gıda sektöründe Endüstri 4.0 uygulamaları, üretim süreçlerinin verimliliğini artırma, maliyetleri düşürme ve gıda güvenliğini sağlama konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Akıllı üretim sistemleri, IoT, yapay zeka, büyük veri analitiği ve robotik teknolojiler gibi Endüstri 4.0 bileşenleri, daha hızlı, güvenilir ve izlenebilir üretim süreçlerinin gerçekleştirilmesini sağlar. Bu teknolojiler, gıda ürünlerinin izlenebilirliğini ve kalitesini etkin bir şekilde kontrol etme imkânı sunmaktadır. Böylece, tüketicilerin güvenliği ön planda tutulmakta ve kontaminasyon riski en aza indirilmektedir. Özellikle sensörler ve IoT sistemleri, üretim aşamasında anlık verilerin toplanıp analiz edilmesine de olanak tanımaktadır. Bu sayede potansiyel tehlikeler erken aşamada tespit edilerek, önleyici tedbirler alınabilmektedir. Endüstri 4.0 uygulamaları ayrıca tedarik zincirindeki şeffaflık ve verimliliği artırarak, gıda ürünlerinin daha güvenli bir şekilde tüketicilere ulaşmasını sağlamaktadır.

Ancak, Endüstri 4.0'ın gıda sektörüne entegrasyonu bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Bu teknolojilerin etkin bir şekilde benimsenebilmesi için yüksek başlangıç yatırımları, altyapı iyileştirmeleri ve sürekli eğitim gerekmektedir. Ayrıca, veri güvenliği ve gizliliği gibi önemli meseleler de dikkatle ele alınmalıdır, çünkü gıda güvenliği ile ilgili verilerin doğru ve güvenli bir şekilde yönetilmesi kritik öneme sahiptir. Küçük ve orta ölçekli şirketler arasında Endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanabilirliğinin tesbiti için araştırmalar ve çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, Endüstri 4.0 teknolojilerinin gıda sektöründe uygulanması, gıda güvenliğini artırma ve genel sektörel verimliliği iyileştirme açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu süreçlerin başarılı olabilmesi için teknoloji ile insan faktörünün uyumlu bir şekilde çalışması, etkili stratejiler ve düzenlemelerle desteklenmesi gerekmektedir. Endüstri 4.0'e uyum sağlamak için siber güvenlik önlemlerinin alınması ve akıllı üretim sistemlerinin entegrasyonu gerekmektedir.

Beyanlar

Etik Onay Belgesi

Bu çalışmada etik kurul gerekmemektedir.

Yazar Katkı Durumları

D.B.K: Kaynak araştırması, orjinal taslağın yazılması, inceleme, düzenleme

H.T: Kaynak araştırması, orjinal taslağın yazılması.

Fon Beyanı

Çalışmada destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Alfian, G., Rhee, J., Ahn, H., Lee, J., Farooq, U., Ijaz, M. F., & Syaekhoni, M. A. (2017). Integration of RFID, wireless sensor networks, and data mining in an e-pedigree food traceability system. *Journal of Food Engineering*, 212, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.008>.
- Ane, T., & Yasmin, S. (2019). Agriculture in the fourth industrial revolution. *Annals of Bangladesh Agriculture*, 23(2), 115-122. <https://doi.org/10.3329/aba.v23i2.50060>.
- Apriliyanti, M. (2022). Challenges of The Industrial Revolution Era 1.0 to 5.0: University Digital Library In Indoensia. *Library Philosophy and Practice*, 1-17. <https://digitalcommons.unl.edu/libphilprac/6994/>.
- Akben İ., & Avşar, İ.İ (2018). Endüstri 4.0 ve Karanlık Üretim: Genel Bir Bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*. <http://tursbad.hku.edu.tr/tr/pub/issue/36831/411081>
- Belaud, J. P., Prioux, N., Vialle, C., & Sablayrolles, C. (2019). Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. *Computers in Industry*, 111, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006>
- Ben Ayed, R., Hanana, M., Ercisli, S., Karunakaran, R., Rebai, A., & Moreau, F. (2022). Integration of innovative technologies in the agri-food sector: the fundamentals and practical case of DNA-based traceability of olives from fruit to oil. *Plants*, 11(9), 1230. <https://doi.org/10.3390/plants11091230>
- Berктаş, S., & Oraklıbel, R. D. (2021). Sanayi Devrimi İle Gelen Değişim: İş Bölümü Ve Yabancılaşma. *Atlas Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(6), 112-121. <https://dergipark.org.tr/en/pub/atlas/issue/60404/782216>.
- Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.013>
- Chapman, J., Power, A., Netzel, M. E., Sultanbawa, Y., Smyth, H. E., Truong, V. K., & Cozzolino, D. (2022). Challenges and opportunities of the fourth revolution: a brief insight into the future of food. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 2845-2853. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1863328>.
- Chen, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, X., Zhang, C., & Cheng, N. (2024). Intelligent Biosensors Promise Smarter Solutions in Food Safety 4.0. *Foods*, 13(2), 235. <https://doi.org/10.3390/foods13020235>
- Cebeci, U., & Arat, E. (2022). Establishing Agri and Food Supply Chain Provenance Based on Blockchain: Literature Review. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (37), 59-64. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1131779>.
- Chhetri, K. B. (2024). Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Food Quality Control and Safety Assessment. *Food Engineering Reviews*, 16(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09363-1>.

- Clairand, J.M., Briceno-Leon, M., Escriva-Escriva, G., Pantaleo, A.M. (2020). Review of Energy Efficiency Technologies in the Food Industry: Trends, Barriers, and Opportunities. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2979077>
- Corallo, A., Latino, M.E., Menegoli, M. (2020). Agriculture 4.0: How Use Traceability Data to Tell Food Product to the Consumers. 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). <https://doi.org/10.1109/icitm48982.2020.9080349>
- Cömert, M., Kanoğlu, E., Güleç, H., & Kaya, M. (2024). Using Blockchain Technology at Supply Chain: The Sample of Migros. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 12(8), 1292-1301. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i8.1292-1301.6705>.
- Dai, N. H. P., Giang, P. P., & Kiet, T. H. V. T. (2024). Readiness of enterprises to implement Industry 5.0. *Modern Technologies and Tools Supporting the Development of Industry 5.0*, 408. <https://doi.org/10.1201/9781003489269-12>.
- Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E., Sepulcre, F., & Pujolà, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in food science & technology*, 75, 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.018>
- De Mattia, F., Bruni, I., Galimberti, A., Cattaneo, F., Casiraghi, M., & Labra, M. (2011). A comparative study of different DNA barcoding markers for the identification of some members of Lamiaceae. *Food Research International*, 44(3), 693-702. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.032>.
- Doğan, M. (2022). Yiyecek ve İçecek Sektöründe Endüstri 4.0 ve Robotik Sistemler. *Uluslararası Multidisipliner İnovatif Yaklaşımlar Kongresi*. <https://acikerisim.gelisim.edu.tr/xmlui/handle/11363/3729>.
- Ediz, Ç. (2021). A food traceability database model with base parameters and algorithms. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 14(3), 313-325. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.656288>.
- Esmer, Ö. K., & Melikoğlu, A. Y. (2015). Gıda güvenliğinin sağlanmasında radyo frekanslı tanımlama teknolojisinin rolü. *Akademik Gıda*, 13(1), 72-80. <https://dergipark.org.tr/en/pub/akademik-gida/issue/55787/763663>.
- Farkas, J., & Mohácsi-Farkas, C. (2011). History and future of food irradiation. *Trends in Food Science & Technology*, 22(2-3), 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.002>.
- Galimberti, A., De Mattia, F., Losa, A., Bruni, I., Federici, S., Casiraghi, M., ... & Labra, M. (2013). DNA barcoding as a new tool for food traceability. *Food research international*, 50(1), 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.036>.
- Gedik, Y. (2021). Endüstri 4.0 Teknolojilerinin ve Endüstri 4.0'ın Üretim ve Tedarik Zinciri Kapsamındaki Etkileri: Teorik Bir Çerçeve. *Journal of emerging economies and policy* (Online). <https://search.trdizin.gov.tr/publication/detail/445382/endust-ri-40-teknolojilerinin-ve-endustri-40in-uretim-ve-tedarik-zinciri-kapsamindaki-etkileri-teorik-bir-cerceve>
- Gerdan, D., Koç, C., & Vatandaş, M. (2020). Gıda ürünlerinin izlenebilirliğinde blok zinciri teknolojisinin kullanımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 16(2), 8-14. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tarmak/issue/56516/717185>.
- Ghag, N., Sonar, H., Jagtap, S., & Trollman, H. (2024). Unlocking AI's potential in the food supply chain: A novel approach to overcoming barriers. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101349. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101349>.
- Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>.
- Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Abdullah, N. A., Goksen, G., ... & Lorenzo, J. M. (2023a). Food processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution. *Food Control*, 145, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109507>.
- Hassoun, A., Alhaj Abdullah, N., Ait-Kaddour, A., Ghellam, M., Beşir, A., Zannou, O., ... & Regenstein, J. M. (2024a). Food traceability 4.0 as part of the fourth industrial revolution: key enabling technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(3), 873-889. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2110033>.
- Hassoun, A., Anusha Siddiqui, S., Smaoui, S., Ucak, İ., Arshad, R. N., Bhat, Z. F., ... & Camara, J. S. (2024b). Emerging technological advances in improving the safety of muscle foods: framing in the context of the food revolution 4.0. *Food reviews international*, 40(1), 37-78. <https://doi.org/10.1080/87559129.2022.2149776>.
- Hassoun, A., & Bigliardi, B. (2024). Industry 4.0 technologies: principles and applications in agriculture and the food industry. In *Food Industry 4.0* (pp. 1-13). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15516-1.00001-3>.
- Hassoun, A., Kamiloglu, S., Garcia-Garcia, G., Parra-López, C., Trollman, H., Jagtap, S., ... & Esatbeyoglu, T. (2023b). Implementation of relevant fourth industrial revolution innovations across the supply chain of fruits and vegetables: A short update on Traceability 4.0. *Food Chemistry*, 409, 135303. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135303>.
- Hassoun, A., Ait-Kaddour, A., Dankar, I., Safarov, J., Ozogul, F., & Sultanova, S. (2024c). The Significance of Industry 4.0 Technologies in Enhancing Various Unit Operations Applied in the Food Sector: Focus on Food Drying. *Food and Bioprocess Technology*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03465-2>
- Hussain, S., Malakar, S. & Arora, V.K. Extrusion-Based 3D Food Printing: Technological Approaches, Material Characteristics, Printing Stability, and Post-processing. *Food Eng Rev* 14, 100–119 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09293-w>
- Ikram, A., Mehmood, H., Arshad, M. T., Rasheed, A., Noreen, S., & Gnedeka, K. T. (2024). Applications of artificial intelligence (AI) in managing food quality and ensuring global food security. *CyTA-Journal of Food*, 22(1), 2393287. <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2393287>.
- İndap, Ş. (2022). *Tarım-gıda Tedarik Zincirinde İzlenebilirlik ve Gıda Güvenliği İçin Blok Zinciri: Kiraz Ürünü Uygulaması* (Master's thesis, Maltepe University (Turkey)). <https://www.proquest.com/openview/db90ffaca388cfb21f84c0a659ad1fcd/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2021). Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. *Cognitive Robotics*, 1, 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2021.06.001>
- Keleş, B., & Ova, G. (2020). Gıda tedarik zinciri yönetiminde bilgi teknolojileri kullanımı. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 17(1), 137-143. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.695732>.
- Khan, S., Singh, R., Khan, S., & Ngah, A. H. (2023). Unearthing the barriers of Internet of Things adoption in food supply chain: A developing country perspective. *Green Technologies and Sustainability*, 1(2), 100023. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2023.100023>.
- Kılıç, R. (2023). Sanayi Devrimlerinin Sertüveni: Endüstri 1.0'dan Endüstri 5.0'a. *Takvim-i Vekayi*, 11(2), 276-291. <https://dergipark.org.tr/en/pub/takvim/issue/80114/1409937>.
- Kutyauripo, I., Rushambwa, M., & Chiwazi, L. (2023). Artificial intelligence applications in the agrifood sectors. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100502. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100502>.
- Lezoche, M., Hernandez, J. E., Díaz, M. D. M. E. A., Panetto, H., & Kacprzyk, J. (2020). Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers*

- in industry, 117, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103187>.
- Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018>
- Mahima, K., Sunil Kumar, K. N., Rakhesh, K. V., Rajeswaran, P. S., Sharma, A., & Sathishkumar, R. (2022). Advancements and future prospective of DNA barcodes in the herbal drug industry. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 947512. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.947512>
- Matloob, R., Bianco, G. M., Marrocco, G., Occhiuzzi, C., Wood, L. C., & Bekhit, A. E. D. A. (2024). Food Traceability 4.0. In *Food Industry 4.0* (pp. 83-97). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15516-1.00005-0>.
- Mehannaoui, R., & Mouss, K. N. (2019). A study with simulation of range free localization techniques in wireless sensors networks. In *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9014694>.
- Mehannaoui, R., Mouss, K. N., & Aksa, K. (2023). IoT-based food traceability system: Architecture, technologies, applications, and future trends. *Food Control*, 145, 109409. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109409>.
- Meliana, C., Liu, J., Show, P. L., & Low, S. S. (2024). Biosensor in smart food traceability system for food safety and security. *Bioengineered*, 15(1), 2310908. <https://doi.org/10.1080/21655979.2024.2310908>.
- Mistry, H. K., Mavani, C., Goswami, A., & Patel, R. (2024). The Impact Of Cloud Computing And Ai On Industry Dynamics And Competition. *Educational Administration: Theory and Practice*, 30(7), 797-804. https://www.researchgate.net/profile/Ripalkumar-Patel/publication/383091191_The_Impact_Of_Cloud_Computing_And_Ai_On_Industry_Dynamics_And_Competition/links/66c13abf145f4d355361fd0/The-Impact-Of-Cloud-Computing-And-Ai-On-Industry-Dynamics-And-Competition.pdf
- Nayik, G. A., Muzaffar, K., & Gull, A. (2015). Robotics and food technology: A mini review. *J. Nutr. Food Sci*, 5(4), 1-11. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000384>.
- Noor Hasnan, N.Z., Yusoff, Y.M. (2018). Short review: Application Areas of Industry 4.0 Technologies in Food Processing Sector. 2018 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). <https://doi.org/10.1109/scored.2018.8711184>
- Ojo, O.O., Shah, S., Coutroubis, A., Jimenez, M.T., Ocana, Y.M. (2018). Potential Impact of Industry 4.0 in Sustainable Food Supply Chain Environment. 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD). <https://doi.org/10.1109/itmc.2018.8691223>
- Oruma, S.O., Misra, S., & Fernandez-Sanz, L. (2021). Agriculture 4.0: An Implementation Framework for Food Security Attainment in Nigeria's Post-Covid-19 Era. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3086453>
- Pal, A., & Kant, K. (2018). IoT-Based Sensing and Communications Infrastructure for the Fresh Food Supply Chain. *Computer*. <https://doi.org/10.1109/mc.2018.1451665>
- Panprommin, D., & R. Manosri. (2022). DNA barcoding as an approach for species traceability and labeling accuracy of fish fillet products in Thailand. *Food Control*. 136:108895. <https://10.1016/j.foodcont.2022.108895>
- Patel, A. S., Brahmhatt, M. N., Bariya, A. R., Nayak, J. B., & Singh, V. K. (2023). Blockchain technology in food safety and traceability concern to livestock products. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16526>.
- Pilevari, N. (2020). Industry revolutions development from Industry 1.0 to Industry 5.0 in manufacturing. *Journal of Industrial Strategic Management*, 5(2), 44. <https://sanad.iau.ir/journal/mgmt/Article/678926?jid=678926>.
- Pollard, S., Namazi, H., & Khaksar, R. (2019). Big data applications in food safety and quality. *Encyclopedia of Food Chemistry*, 356-363. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21839-8>.
- Raschke, S. U. (2022). Limb prostheses: Industry 1.0 to 4.0: Perspectives on technological advances in prosthetic care. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, 3, 854404. <https://doi.org/10.3389/fresc.2022.854404>.
- Rejeb, A., Keogh, J. G., & Rejeb, K. (2022). Big data in the food supply chain: a literature review. *Journal of Data, Information and Management*, 4(1), 33-47. <https://doi.org/10.1007/s42488-021-00064-0>.
- Sadeghi, K., Kim, J., & Seo, J. (2022). Packaging 4.0: The threshold of an intelligent approach. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2615-2638. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12932>.
- Sapkal, A., & Kusi, S. S. (2024). Evolution of Cloud Computing: Milestones, Innovations, and Adoption Trends. https://www.researchgate.net/profile/Leoson-Heisnam-2/publication/379052734_Evolution_of_Cloud_Computing_Milestones_Innovations_and_Adoption_Trends/links/6674e532d21e220d89c509cf/Evolution-of-Cloud-Computing-Milestones-Innovations-and-Adoption-Trends.pdf
- Scholten, H., Verdouw, C. N., Beulens, A., & Van der Vorst, J. G. A. J. (2016). Defining and analyzing traceability systems in food supply chains. In *Advances in food traceability techniques and technologies* (pp. 9-33). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100310-7.00002-8>.
- Senturk, S., Senturk, F., & Karaca, H. (2023). Industry 4.0 technologies in agri-food sector and their integration in the global value chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137096. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137096>.
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. *Data Science and Management*, 7(1), 47-63. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2021.10.006>
- Sri Vigna Hema, V., & Manickavasagan, A. (2024). Blockchain implementation for food safety in supply chain: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(5), e70002. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70002>
- Tao, Q., Ding, H., Wang, H., & Cui, X. (2021). Application research: Big data in food industry. *Foods*, 10(9), 2203. <https://doi.org/10.3390/foods10092203>.
- Tao, Z., & Chao, J. (2024). The impact of a blockchain-based food traceability system on the online purchase intention of organic agricultural products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 92, 103598. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103598>.
- Tripoli, M., & Schmidhuber, J. (2020). Optimising traceability in trade for live animals and animal products with digital technologies. *Rev. Sci. Tech*, 39(1), 235-244. <https://doi.org/10.20506/rst.39.1.3076>.
- Van der Vorst, J., Beulens, A., & van Beek, P. (2005). Innovations in logistics and ICT in food supply chain networks. In *Innovation in agri-food systems* (pp. 245-292). Wageningen Academic. https://doi.org/10.3920/9789086866663_011.
- Wardhani, W. F., Karyani, T., Setiawan, I., & Rustidja, E. S. (2023). The effect of performance on the sustainability of coffee farmers' cooperatives in the industrial revolution 4.0 in West Java Indonesia. *Sustainability*, 15(6), 4901. <https://doi.org/10.3390/su15064901>
- Wei, Z., Alam, T., Al Sulaie, S., Bouye, M., Deebani, W., & Song, M. (2023). An efficient IoT-based perspective view of food traceability supply chain using optimized classifier algorithm. *Information Processing & Management*, 60(3), 103275. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2023.103275>.

- Xu, J., Guo, S., Xie, D., & Yan, Y. (2020). Blockchain: A new safeguard for agri-foods. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.08.002>.
- Yakubu, B. M., Latif, R., Yakubu, A., Khan, M. I., & Magashi, A. I. (2022). RiceChain: Secure and traceable rice supply chain framework using blockchain technology. *PeerJ Computer Science*, 8, e801. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.801>.
- Yang, F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2017). Recent development in 3D food printing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(14), 3145-3153. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1094732>
- Yaralı, E. (2019). Gıda zincirinde izlenebilirlik. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 23(1), 108-119. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.394856>.
- Yıldızbası, A., & Üstünyer, P. (2019). Tarımsal gıda tedarik zincirinde blokzincir tasarımı: Türkiye’de hal yasası örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21(2), 458-465. <https://doi.org/10.24011/barofd.584025>.
- Yu, J., Wu, X. I., Liu, C., Newmaster, S., Ragupathy, S., & Kress, W. J. (2021). Progress in the use of DNA barcodes in the identification and classification of medicinal plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111691. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111691>.
- Yu, Q., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2024). Blockchain-based fresh food quality traceability and dynamic monitoring: Research progress and application perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109191. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109191>