

Review Article

Bitkisel Tarımda Kullanılan Ürün İzleme Teknolojilerinin İncelenmesi

Bora ASLAN ^{1*}, Füsün YAVUZER ASLAN ²¹ Gıda Arz Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uyg. ve Araş. Merkç., Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye² Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye*Corresponding author: bora.aslan@klu.edu.tr

Ö Z E T

MAKALE
BİLGİSİ

Hızla artan nüfus, iklim krizi ve gıda güvenliği sorunları, tarımsal üretimde dijitalleşme ve ürün izleme teknolojilerinin önemini her geçen gün artırmaktadır. Dijitalleşmenin, gıda güvenliği, sürdürülebilirlik ve verimlilik gibi kritik alanlara önemli katkılar sağladığı bilinmektedir. Özellikle ürün izleme teknolojileri, verimliliği artırma, kaynak kullanımını optimize etme ve çevresel etkileri azaltma açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, ürün izleme teknolojileri; otomasyon ve robotik, görüntüleme ve sensörler, büyük veri ve veri analitiği başlıkları altında incelenmiştir. GPS, IoT ve yapay zeka gibi ileri teknolojilerin tarım sektöründe kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, tarımsal süreçlerin daha verimli hale geldiği, üretimden tüketiciye kadar izlenebilirliğin ve şeffaflığın sağlandığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, yakın gelecekte dijital ikiz teknolojisinin tarımda uygulanmasıyla tarımsal verimliliğin artacağı ve daha sürdürülebilir bir üretim yapılacağı öngörülmektedir.

Geliş:
10.12.2024
Kabul:
26.05.2025

Anahtar kelimeler: Ürün İzleme, Otomasyon ve Robotik, Görüntüleme ve Sensörler, Büyük Veri ve Veri Analitiği

Analysis of Crop Monitoring Technologies Used in Crop Agriculture

ABSTRACT

ARTICLE
INFO

The rapidly growing population, climate crisis, and food security issues are increasingly highlighting the importance of digitalization and product tracking technologies in agricultural production. It is well-known that digitalization provides significant contributions to critical areas such as food safety, sustainability, and efficiency. In particular, product tracking technologies hold great potential for enhancing efficiency, optimizing resource use, and reducing environmental impacts. In this study, product tracking technologies are examined under the categories of automation and robotics, imaging and sensors, big data, and data analytics. With the widespread use in advanced technologies such as GPS, IoT, and artificial intelligence in the agricultural sector, it has been demonstrated that agricultural processes have become more efficient, and traceability and transparency have been ensured from production to the consumer. Furthermore, it is anticipated that the application of digital twin technology in agriculture in the near future will enhance agricultural productivity and enable more sustainable production.

Received:
10.12.2024
Accepted:
26.05.2025

Keywords: Crop Monitoring, Automation and Robotics, Imaging and Sensors, Big Data and Data Analytics

Cite this article as: Aslan, B., & Yavuzer Aslan, F. (2025). Bitkisel tarımda kullanılan ürün izleme teknolojilerinin incelenmesi. *Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences*, 15(1), 132-145. <https://doi.org/10.53518/mjavl.1599535>

GİRİŞ

Dünya nüfusunun giderek artması, iklim krizi, savaşlar, küresel ısınma, küresel göç hareketliliği gibi bütün dünyayı etkileyen faktörler sebebiyle insanlık gıdaya erişim problemi ve kaynakların hızlıca tükenmesi riskiyle karşılaşmaktadır. Birleşmiş Milletler tarafından “Dünya Nüfus Tahmini” raporunda Dünya nüfusunun 2030’da 8,6 milyar, 2050’de 9,8 milyar ve 2100’de 11,2 milyarı geçmesinin beklendiği açıklanmıştır (O’Sullivan, 2023). Gıda ve Tarım Örgütü ise 2050’de dünya nüfusunun 9,1 milyara ulaşacağı ve dünya nüfusunun gıdaya ulaşımının ve beslenmesinin ciddi bir sorun olacağını ve bunun ile ilgili tüm ülkelerin politikalar geliştirmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Aynı şekilde 2050’de gıda ihtiyacında artışın ise %60’dan daha yüksek olacağından hareketle küresel tarım ve gıda arzının artması gerektiğini ifade etmektedir (Le Mouél ve Forslund, 2017) Artan nüfusun gıda ihtiyacını karşılamak için verim artışının yanı sıra ülkelerin tarımsal Ar-Ge alanına yatırımlarını artırması ve bu doğrultuda politikalar geliştirmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda gıda değer zincirinin tüm aşamalarında ortaya çıkabilecek risklere karşın gelişmiş dijital çözümlerin ortaya konulması önemlidir.

Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de bu durum tüm yetkili otoriteler tarafından tartışılmakta ve çözümler aranmaktadır. Onuncu Kalkınma Planı döneminde (2014-2018) tarım sektöründe yapısal dönüşümün sağlanması amacıyla tarımsal desteklerin çeşitlendirilmesi, gıda güvenirliliği, toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, araştırma geliştirmenin artırılması, tarım işletmelerinin modernizasyonu, bitki ve hayvan sağlığı ile ıslahı başta olmak üzere çeşitli çalışmalar yürütülmüştür (T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2013). On Birinci Kalkınma Planı döneminde (2019-2023) benzer şekilde çalışmaların ivme kazanarak devam edeceği belirtilmektedir. On Birinci Kalkınma Planında, Küresel Gelişmeler ve Eğitimler başlığında İklim Değişikliği, Gıda Güvenliği ve Suyun Etkin Kullanımına ilişkin tespitler yer almaktadır. Belirtilmekte olan tespit ve değerlendirmeler arasında; artan gıda talebi, iklim değişikliği, şehirleşme, toprak ve su kaynakları ile tarımsal ürünler ve üretici üzerinde baskı oluşturmaları; değişen iklime uygun bitki ve hayvan türlerinin geliştirilmesi, çevre ve biyolojik çeşitliliğin korunmasının önemi, daha az kaynakla gıda talebinin karşılanabilmesi için nitelikli işgücü ve teknolojiye ihtiyaç duyulması yer almaktadır. Ayrıca giderek önemi artan toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, gıda güvenliği, tarımda daha fazla teknoloji / bilgi kullanımı ile girdi kullanımının etkinleştirilmesi ve pazarlama kanallarının çeşitlendirilerek üretimin talebe uygun olarak yönlendirilmesi çabalarının artmakta olduğu ortaya konulmuştur (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019). On İkinci Kalkınma Planı döneminde (2024-2028) ise akıllı tarım uygulamaları, tarımsal arazilerin korunması, planlı bitkisel ve hayvansal üretim, gıda güvenliği, sürdürülebilir tarım, üretici kayıt sistemleri ve ilgili bilgi sistemlerinin geliştirilmesi, dijitalleşme ve yapay zeka kullanımının yaygınlaştırılması gibi başlıklar öne çıkmaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Buna göre Türkiye’de yakın zamanda tarımsal üretimde dijitalleşme ve yapay zekâ kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla, akıllı tarım uygulamaları teşvik edilecek ve bu doğrultuda tarımsal üretici kayıt sistemleri diğer kayıt sistemleriyle entegre edilerek iyileştirilecektir. Bu entegrasyon, tarım sayımı ve kapsamlı bir tarım envanterinin oluşturulmasını destekleyecek, aynı zamanda ürün izlenebilirliğini sağlayacaktır. Tarım istatistiklerinin derlenmesi, işlenmesi, analizi ve kontrolü için geliştirilecek bilgi sistemleri, üretim süreçlerinin izlenmesini, erken uyarı sistemlerini, piyasa kontrollerini ve üretim planlamasını kolaylaştıracaktır. Ayrıca tarım arazilerinin korunması, sürdürülebilir kullanımı ve etkin yönetimi sağlanacak, arazi toplulaştırma çalışmaları sulama yatırımlarıyla entegre edilerek verimliliği artırırken, ürün izleme ve izlenebilirliğini destekleyen bir altyapı oluşturulacaktır.

Ürün izleme; verimlilik artışı, sürdürülebilirlik, gıda güvenliği, izlenebilirlik, karar destek sistemleri gibi birçok açıdan ilerlemeyi sağlamaktadır (Gomiero, 2019). Ürün izleme teknolojileri çiftçilere tarımsal faaliyetlerini daha verimli bir şekilde yürütmesine yardımcı olmaktadır. Uzaktan algılama, IoT (Nesnelerin İnterneti) sensörleri ve yapay zeka gibi teknolojiler, ürünlerin gelişim aşamalarını anlık veya belirli periyotlar ile izleme imkanı sunmaktadır. Bu sayede çiftçiler verimliliklerini artırmak için doğru kararları zamanında alabilmekte ve kaynaklarını daha etkin bir şekilde kullanabilmektedir. Sürdürülebilir tarım uygulamaları, tarımsal üretimin çevresel etkilerini azaltmayı amaçlarlar. Ürün izleme teknolojileri, toprak sağlığı, su kullanımı ve hava koşulları gibi çevresel faktörleri izleyerek tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır (Aydın Eryılmaz ve Kılıç, 2018). Bu da çiftçilerin uzun vadede doğal kaynaklarını koruyarak üretim yapmalarına olanak tanımakta ve girdilerini azaltmaktadır. Ürün izleme teknolojileri, tarladan sofraya uzanan tüm tedarik zinciri boyunca ürünlerin her aşamada doğru ve etkin bir şekilde izlenmesini sağlamaktadır.

Özellikle tüketicilerin ürünlerin menşei ve üretim süreçleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olması açısından geliştirilen izlenebilirlik sistemleri için de ürün izleme önemlidir. Ayrıca üretim sürecinde ortaya çıkabilecek sorunların konumunu tespit etmek için izleme gereklidir. Ürün izleme sistemleri, yapay zeka ve büyük veri analitiği ile entegre edilerek tarımda daha hassas ve öngörücü analizler yapılmasına olanak tanımaktadır (Kumar ve ark., 2022). Çiftçiler, elde edilen veriler doğrultusunda tarımsal süreçleri optimize edebilmekte, olası hastalık ve zararlıları önceden tespit edebilmekte ve hatta iklim değişikliklerine göre planlama yapabilmektedir

Ürün izleme teknolojisi, ürünlerin çiftlik düzeyinde izlenmesini içeren hassas tarımın bir parçasıdır. IoT'ye dayalı bağlantılı bir ekosistemle birlikte ürün sağlığı, zararlıların ve hastalık istilasının belirlenmesi, hava koşulları, toprak izleme, sulama izleme, verim tahminleri, stres tespiti vb. ile ilgili önemli bilgileri toplamak için sensörlerin, İHA'ların ve kamera sistemlerinin kullanılması bu pazarın büyümesinin önünü açmıştır. Ürün izleme, çiftçilerin ettikleri ve hasat ettikleri tarımsal ürünlerin verimini artırmak ve çevresel kaynakları daha verimli kullanan bir tarım modeli geliştirmek amacıyla başvurdukları çeşitli teknolojileri ifade etmektedir. Yapay zeka, makine öğrenmesi, uydu görüntüleme ve veri analitiği gibi bu teknolojiler, küçük ölçekli üreticilerin dahi ürün durumunu izlemelerine ve daha yüksek verim elde etmelerine olanak sağlamaktadır. (Ennouri ve ark., 2021). Halihazırda yaygın olarak kullanılan GPS teknolojisi, çiftçilere girdilerin daha verimli kullanılması ve tarımsal işlemlerin hassas bir şekilde yürütülmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. GPS ile donatılmış tarım makineleri, belirlenen hatlar üzerinde minimum sapma ile çalışarak gereksiz tohum, gübre ve ilaç kullanımını önlemekte; bu sayede ürün izleme süreçlerine yüksek doğrulukta konumsal veri sağlamaktadır. (Torres-Torriti ve Burgos, 2023) Örneğin, GPS destekli gübreleme sistemleri yalnızca ihtiyaç duyulan alanlara uygulama yaparak hem maliyetleri azaltmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır. Bu entegrasyon ürün izleme altyapısının daha hassas ve etkin çalışmasına olanak tanımaktadır. Bu altyapının bir diğer önemli bileşeni ise sensörler ve uzaktan algılama teknolojileridir. Birçok sensör, toprakta bulunan besin maddeleri, nem, pH ve çevresel faktörler gibi çeşitli parametreleri izlemek ve ölçmek amacıyla kullanılmakta; bu veriler gerçek zamanlı olarak çiftçiler, ziraat mühendisleri ve araştırmacılar tarafından karar destek amacıyla değerlendirilmektedir (Paul ve ark., 2022). Aynı şekilde özellikle tarım için programlanmış ve geliştirilmiş İHA'lar ve uydularla elde edilen tarla görüntüleri, gelişmiş görüntü işleme teknikleriyle analiz edilerek hastalık tespiti, zararlı istilası, düzensiz büyüme ve bitki örtüsü indeksine dair önemli öngörüler sunmakta ve özellikle gelişmiş ülkelerde bu yöntemlerin hızlı bir şekilde yaygınlaştığı görülmektedir. (Barnes ve ark., 2019)

Ürün izleme sektörünün büyümesini sağlayan en önemli faktör, yapay zeka ve IoT tabanlı ürün izleme cihazlarının önder çiftçiler veya kooperatifler tarafından benimsenmesi ve bunun üzerine özellikle verimliliğin artması ile iyi örneklerin ortaya çıkmasıdır. Algılama teknolojileri ile birlikte yapay zeka kullanımı, gerçek zamanlı veya geçmiş veriler üzerinden analiz ile izleme sağlayarak insan müdahalesini ve bağımlılığı azaltmıştır. Ürün izleme pazarı, tarım sektöründe gerçek zamanlı bilgi toplama ve buna göre harekete geçme ihtiyacı arttıkça önemli bir potansiyele sahip olup, henüz gelişme aşamasındadır. Sensörlerin kullanımı, yenilikler ve sensör maliyetlerinin düşmesi sayesinde tarım arazilerinde daha yaygın hale gelmiştir. Ayrıca, birçok şirket tarım teknolojisi sektörüne büyük yatırımlar yapmış olup, 2019 yılında çiftlik teknolojisi girişimlerine toplam 4.7 milyar dolar yatırım yapılmıştır. Ürün izleme pazarının 2020'de 2.1 milyar dolardan 2025'te 4.4 milyar dolara büyümesi öngörülmektedir. (Markets and Markets, 2020).

Ürün izleme sektöründe Amerika kıtası, ürün izleme pazarında en büyük payı alan bölgedir. Bunun nedeni, Topcon, AgLeader, Trimble ve PrecisionHawk gibi büyük pazar oyuncularının bu bölgede bulunmasıdır. Bu şirketler, yenilikçi ürünler ve hizmetler sunarak ve Ar-Ge çalışmalarına büyük yatırımlar yaparak pazarın büyümesine katkıda bulunmuştur. ABD ve Kanada gibi ülkeler, uzaktan algılama ve görüntüleme teknolojilerinin yanı sıra otomasyon ve robotik alanında da erken benimseyenler arasında yer almaktadır (Research And Markets, 2025). Avrupa kıtasında -özellikle batı tarafında- iş gücü kıtlığı ve tarımsal üretimde kendine yeterlilik ihtiyacı nedeniyle tarımda uzaktan algılama ve otomasyon teknolojilerini erken benimsemiştir. Asya-Pasifik bölgesi ise algılama, görüntüleme ve değişken oran teknolojileri açısından gelecek vadede pazarlardan biridir. Bölgedeki yüksek nüfus artışı ve tarımsal üretime olan talep, pazarın hızlı büyümesine katkıda bulunmaktadır (Markets and Markets, 2020). Hindistan, Avustralya, Çin ve Japonya bu bölgede önemli pazar payına sahip ülkeler olup, Asya-Pasifik pazarının 2020'den 2025'e kadar hızlı bir büyüme oranıyla gelişmesi beklenmektedir (Markets and Markets, 2020). Ürün izleme pazarındaki başlıca büyük şirketler CropX Technologies (İsrail), Topcon (ABD), Trimble (ABD), CropIn (Hindistan), Resson (Kanada),

Gamaya (İsviçre), AtFarm (Norveç), Bosch (Almanya) ve Telit (İngiltere) gibi şirketlerdir. Şirketlerin her biri yüksek teknoloji ürünleri geliştirerek tarım ile buluşturmuşlardır. İsrail merkezli CropX Technologies, toprak sensörleri ve veri analitiği yazılımları ile tarla bazlı karar destek sistemleri sunarken; Topcon ve Trimble (ABD) hassas GPS tabanlı ekipmanlar, otomatik sürüş sistemleri ve veri analiz platformları ile entegre çözümler üretmektedir. Hindistan'dan CropIn, yapay zeka destekli dijital tarla yönetimi platformları geliştirerek üreticilere gerçek zamanlı izleme imkânı sunmaktadır. Resson (Kanada) görüntü işleme ve makine öğrenmesi ile tarla sağlığını tespit eden çözümler üretirken, Gamaya (İsviçre) hiperspektral görüntüleme teknolojisi ile hastalık, zararlı ve besin eksikliklerini tespit etmektedir. Norveçli AtFarm, uydu görüntüleri üzerinden azot yönetimi ve bitki sağlığı izleme hizmeti sunarken, Bosch (Almanya) tarım makinelerine entegre edilebilen IoT tabanlı sensör çözümleri geliştirmektedir. Telit (İngiltere) ise bağlantılı tarım çözümleri için IoT modülleri ve veri iletişim altyapıları sağlamaktadır.

Öte yandan, dünya genelinde çiftçiler arasında dijital ve tarımsal teknolojilere yönelik okuryazarlığın artması, bu teknolojilerin benimsenmesini hızlandırmakta (Deichmann ve ark., 2016); tarımsal teknoloji ve girişim sermayesi yatırımlarındaki artış ile sağlanan kamu ve özel sektör teşvikleri de ürün izleme pazarının genişlemesine katkıda bulunmaktadır (Birner ve ark., 2021). Bu gelişmelerle birlikte, ürün izleme sistemleri sadece büyük ölçekli üreticilerin değil, küçük ve orta ölçekli çiftçilerin de erişebileceği bir yapıya dönüşmektedir. Ancak özellikle gelişmekte olan ülkelerde ileri tarım teknolojilerinin mekanizasyon altyapısına entegre edilebilirliğinin sınırlı olması ve kırsal alanlardaki yetersiz internet altyapısı, bu yaygınlaşmanın önündeki önemli engeller arasında yer almaktadır. Ayrıca bazı geleneksel üreticilerin yeni teknolojilere karşı isteksiz tutumu da benimsenme sürecini yavaşlatabilmektedir. Tüm bu unsurlar, ürün izleme teknolojilerinin yaygınlaşması ve etkili kullanımı için sadece teknik değil, aynı zamanda sosyal ve altyapısal düzeyde bütüncül yaklaşımlar geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

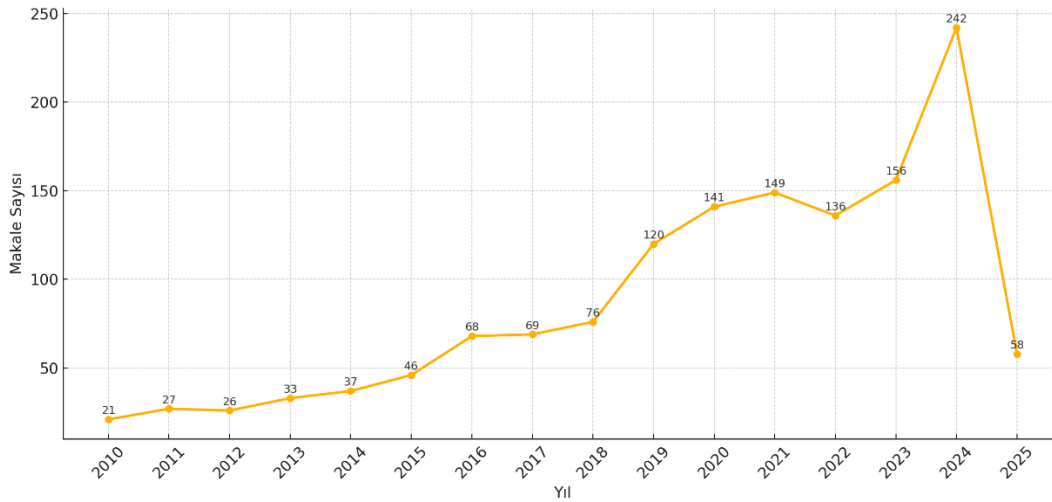
Bu çalışmada, ürün izleme teknolojilerine ilişkin kapsamlı bir bakış açısı sunmak amacıyla pazar raporları, bilimsel çalışmalar ve ilgili diğer kaynaklar bibliyometrik şekilde incelenmiştir. Bibliyometrik analiz bilimsel yayınların istatistiksel yöntemlerle incelenmesini sağlayan sistematik, şeffaf ve tekrarlanabilir bir literatür tarama yöntemidir. Bu analiz, hızla artan yayın hacmi karşısında bilgi birikimini anlamlandırmak, bilimsel alanların yapısını ve gelişimini haritalamak, en etkili çalışmalar ve yazarları belirlemek amacıyla kullanılır. Ayrıca bu yöntem araştırma önceliklerini belirlemeye yardımcı olurken, nesnel ve güvenilir bir inceleme sunar. Bu nedenle bibliyometrik analiz hem akademik değerlendirmelerde hem de politika yapım süreçlerinde önemli bir araçtır. (Aria ve Cuccurullo, 2017).

Bilimsel yayın taramaları için Clarivate Analytics Web of Science veri tabanı kullanılmış, Ocak 2010 ile Ocak 2025 tarihleri arasını kapsayan literatür incelenmiştir. Bu zaman dilimi, hem alanın temellerini hem de en güncel gelişmeleri değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Tarama kriterleri, tarım, tedarik zinciri yönetimi ve dijital inovasyon gibi alanlarda ürün izleme teknolojilerine odaklanan çalışmaları belirlemek üzere oluşturulmuştur. Ayrıca, akademik yayınların yanı sıra önde gelen sektör analistlerinin hazırladığı pazar raporları, beyaz kitaplar, bildiriler ve patentler de analiz edilmiştir. Bu belgeler, teknolojilerin pratikteki uygulamaları, benimsenme düzeyleri, karşılaşılan zorluklar ve ekonomik etkilerine dair kapsamlı veriler sunmuştur. Bu çok boyutlu yaklaşım sayesinde, ürün izleme sistemlerinin güncel uygulamaları, karşılaştığı temel sorunlar ve sürdürülebilirlik, kaynak verimliliği ile izlenebilirlik gibi konularda sunduğu potansiyel katkılar derinlemesine incelenmiştir. Pazar raporları, mevcut pazar dinamiklerini ve gelecek projeksiyonlarını ortaya koyarken; bilimsel çalışmalar ise teorik çerçeve ve deneysel bulgular aracılığıyla çalışmanın akademik temellerini desteklemiştir. Ayrıca, benzer çalışmalardan elde edilen yöntem ve bulguların karşılaştırmalı analizi, metodolojinin sağlamlığını ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

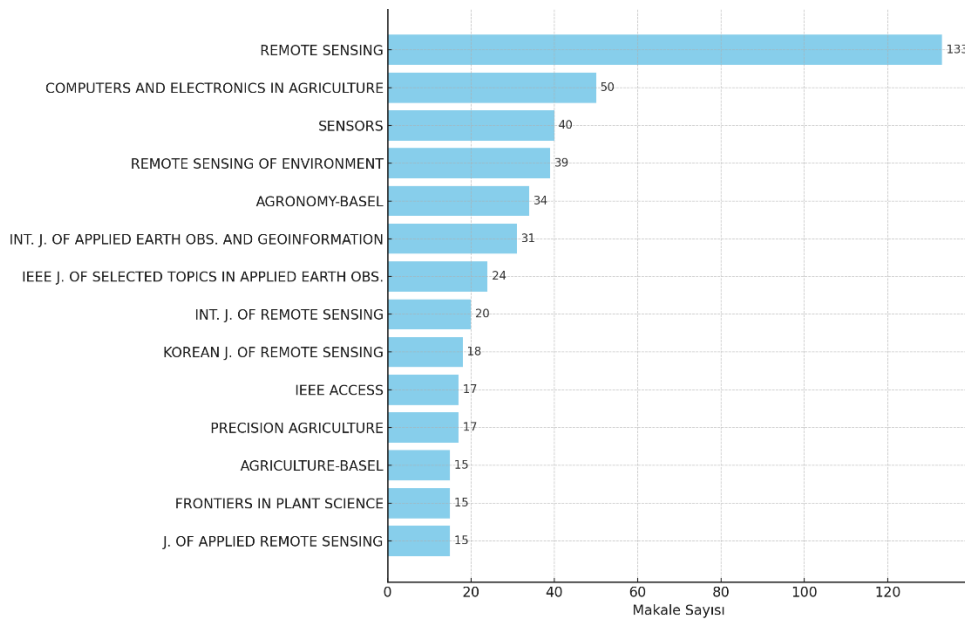
Web of Science taraması sonucunda belirtilen kriterlere uygun 1405 çalışma tespit edilmiştir. Bu çalışmalar, 615 farklı kaynaktan yayımlanmış olup, toplamda 5902 yazar tarafından katkı sağlanmıştır. Yazarların %30,75'i uluslararası ortak yazarlık ile çalışmalar yürütmüştür. Çalışmalarda toplam 45231 farklı kaynak kullanılmıştır ve yayın başına ortalama atıf sayısı 21,46 olarak hesaplanmıştır. Yıllara göre bakıldığında her yıl bu alanda yapılan çalışmaların artış gösterdiği Şekil 1'de gösterilmiştir. 2010'dan 2025'e kadar yıllara göre ürün izleme konulu bilimsel yayınların sayısal dağılımı gösterilmektedir. Özellikle 2016 yılından itibaren

belirgin bir artış eğilimi görülmektedir. 2019 sonrası dikkat çekici bir yükseliş yaşanmış, 2024 yılında zirveye ulaşarak 242 yayına kadar çıkmıştır. 2025 verisi ise sadece yılın ilk çeyreğini kapsadığı için düşük görünmekte (58 yayın) ancak genel eğilim, bu alandaki akademik ilginin sürekli arttığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 1: Yıllara göre ürün izleme konusundaki WOS yayın sayıları

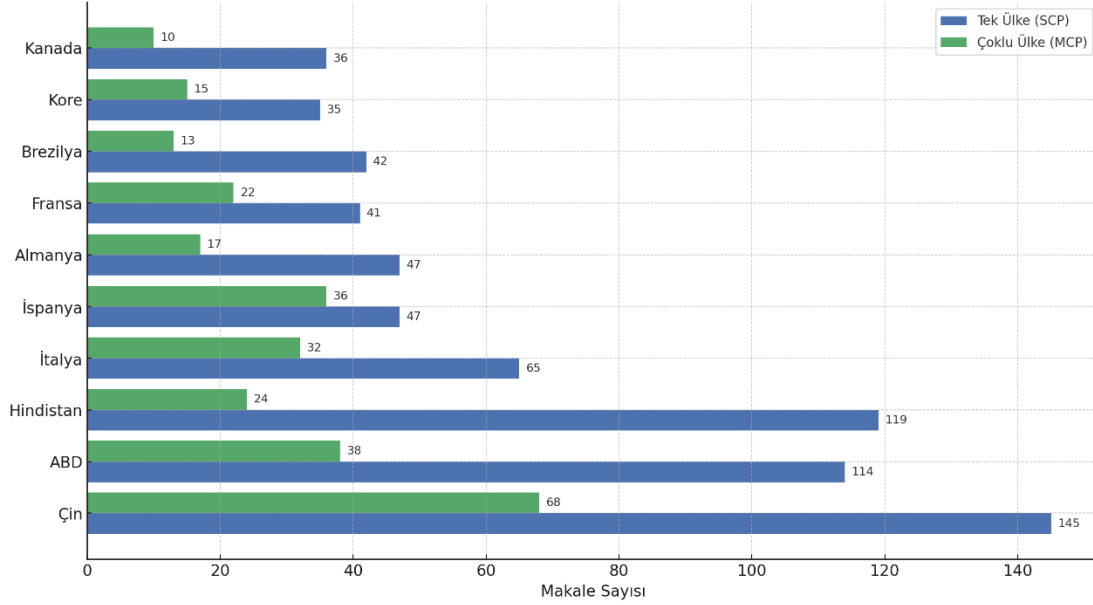
Şekil 2’de, ürün izleme teknolojileri üzerine 15 ve üzeri yayın yapan akademik dergiler görselleştirilmiştir. En çok yayını yapan dergi Remote Sensing olup, 133 makale ile açık ara öndedir. Bu dergiyi sırasıyla Computers and Electronics in Agriculture (50), Sensors (40) ve Remote Sensing of Environment (39) takip etmektedir. Liste ağırlıklı olarak uzaktan algılama, hassas tarım, sensör teknolojileri ve elektronik tarım uygulamaları odaklı dergilerden oluşmaktadır. Bu durum, ürün izleme konusunun disiplinlerarası yapısını ve özellikle uzaktan algılama ile sensör sistemlerinin bu alandaki merkezi rolünü ortaya koymaktadır.



Şekil 2: Çalışmaların Yayınlandığı Dergilere göre Dağılımı

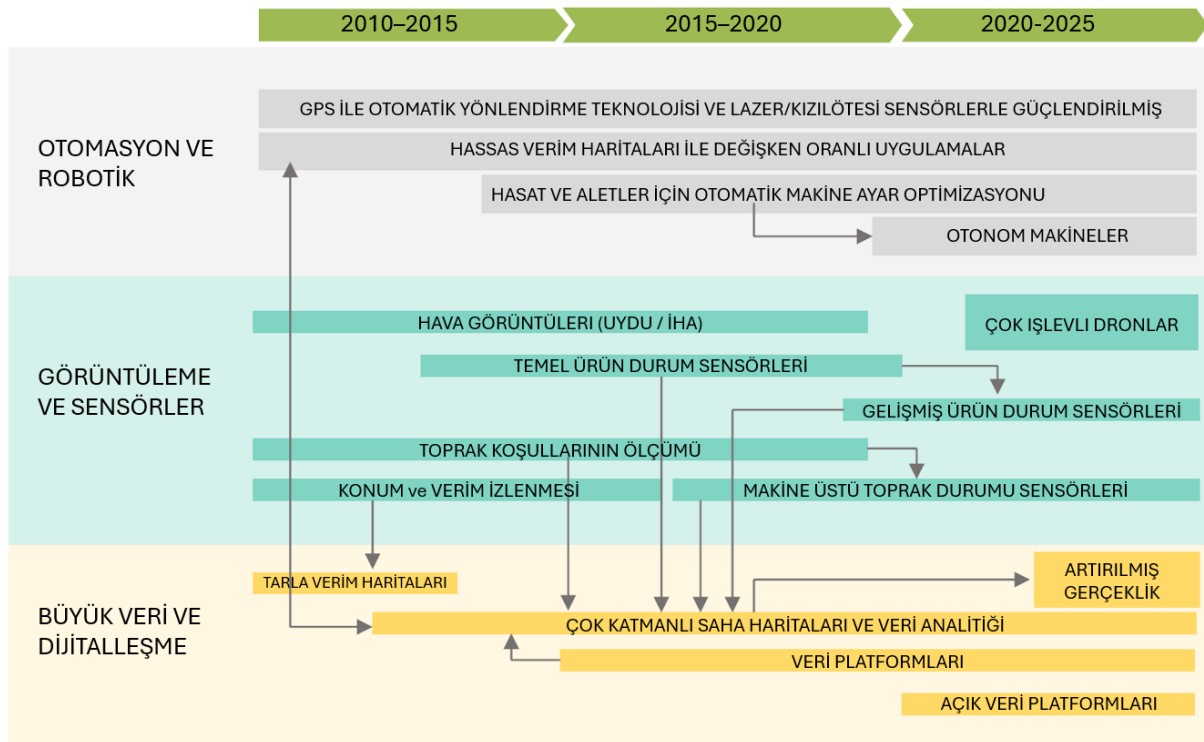
Şekil 3’te ürün izleme teknolojileri alanında en fazla bilimsel yayına sahip ilk 10 ülkeyi, toplam yayın sayılarına göre büyükten küçüğe sıralı olarak göstermektedir. Her ülkenin yayınları, tek ülke ortaklığı (SCP) ve çok uluslu ortaklık (MCP) olmak üzere iki kategoride sunulmuştur. En fazla yayını gerçekleştiren ülke 213 yayımla Çin olurken, onu 152 yayımla ABD ve 143 yayımla Hindistan takip etmektedir. Bu üç ülke, toplam yayın sayısında açık farkla öndedir. Onları sırasıyla İtalya (97), İspanya (83), Almanya (64), Fransa (63), Brezilya (55), Kore (50) ve Kanada (46) izlemektedir. Avrupa ülkeleri olan İtalya, İspanya, Almanya ve Fransa’nın yayın sayıları orta düzeydedir; ancak bu ülkelerde çok uluslu ortaklığa dayalı yayın oranlarının görece yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle İspanya, tek ülke ve çoklu ortaklı yayınlar arasında dengeli bir

dağılıma sahiptir. Buna karşılık, Çin, Hindistan ve ABD gibi ülkelerde yayınların büyük kısmı yerel araştırmacılar tarafından üretilmiştir. Bu farklılıklar, ülkelerin araştırma iş birliği stratejileri ve uluslararası bilimsel etkileşim düzeyleri hakkında önemli ipuçları sunmaktadır.



Şekil 3: Çalışmaların Ükelere göre Dağılımı

Çalışmada ürün izleme sistemleri 3 kategoride incelenmiştir. Bunlar sırası ile otomasyon ve robotik, görüntüleme ve sensörler, büyük veri ve veri analitiğidir. İncelenen çalışmalar arasında, Görüntüleme ve Sensörler kategorisi %46,31 ile en yüksek orana sahiptir. Otomasyon ve Robotik kategorisi %45,64 oranıyla bunu yakından takip ederken, Büyük Veri ve Veri Analitiği kategorisi %8,05 oranıyla düşük paya sahiptir. 2010-2025 yılları arasında ürün izleme teknolojilerindeki gelişmeleri ve hangi dönemlerde hangi teknolojilerin öne çıktığını zaman çizelgesi şeklinde Şekil 'de göstermektedir. Üç ana kategoriye ayrılan bu süreçte ilk olarak otomasyon ve robotik alanında, 2010-2015 yılları arasında GPS (Küresel Konumlama Sistemi) ile otomatik yönlendirme teknolojisi ve lazer/kızılötesi sensörlerin kullanımı öne çıkmıştır. 2015-2020 yıllarında hassas tarım verim haritaları ve değişken oranlı uygulamalarla birlikte makinelerde otomatik ayar optimizasyonu sağlanmış, 2020-2025 döneminde ise otonom tarım makineleri bu alanda önemli bir yer edinmiştir. Görüntüleme ve sensörler kategorisinde, 2010-2015 yılları arasında hava görüntüleri ile temel ürün durumu sensörleri kullanılmaya başlanmış, 2015-2020 döneminde toprak koşullarının ölçümü ve gelişmiş ürün durumu sensörleri devreye girmiştir. 2020-2025 yılları arasında ise çok işlevli İHA'lar ve makine üstü toprak durumu sensörleri bu alandaki gelişimi sürdürmektedir. Büyük veri ve dijitalleşme ise 2010-2015 yılları arasında tarla verim haritalarıyla başlamış, 2015-2020 döneminde çok katmanlı saha haritaları ve veri analitiği, veri platformları ile daha karmaşık hale gelmiş ve 2020-2025 yılları arasında artırılmış gerçeklik ve açık veri platformlarının gelişimiyle daha ileri bir düzeye taşınmıştır. Şekil 4 ürün izleme dijitalleşmenin ve otomasyonun zamanla nasıl geliştiğini ve gelecekte hangi teknolojilerin öne çıkacağını ortaya koymaktadır.



Şekil 4: Ürün İzleme Pazarındaki Mevcut ve Gelecek Teknolojileri (Markets and Markets raporu kullanılarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Otomasyon ve Robotik

Otomasyon ve robotik, ürün izleme ve karar destek süreçlerinde GPS veya benzeri konumlandırma teknolojilerini kullanan gelişmiş otomatik dümenleme sistemleri ile tarım robotlarının kullanımını kapsamaktadır. Otomatik dümenleme sistemleri, traktörler ve otonom tarım makinelerini hassas bir şekilde yönlendiren navigasyon sistemleridir. Bu sistemler; sürüş, ekim ve hasat işlemlerinde doğruluğu artırmanın yanı sıra, enerji tüketimini azaltmak, verim kayıplarını en aza indirmek ve tarım girdilerinin daha verimli kullanılmasını sağlamak gibi birçok avantaj sunmaktadır (Fountas ve ark., 2020). Mevcut durumda bazı tarım makinelerinde, ürün izleme tekniklerinin bir parçası olarak yönlendirme teknolojisini veya otomatik dümenleme cihazlarını kullanmaktadır. Ürün izlemede, GPS cihazları tarla haritalama, toprak örnekleme, ekim/biçim yönlendirme teknolojisi, ürün keşfi, değişken oranlı gübreleme uygulamaları ve verim haritalama için çiftliklerde traktörlere ve otonom araçlara yerleştirilmektedir. Otomasyon ve robotik kategorisi içinde ilaçlama yapan İHA'lar, yabancı ot biçiminde kullanılan robotlar ve benzeri birçok makine sayılabilmektedir (Hasan ve ark., 2021).

Yapılan bibliyometrik araştırmada bu alanda ciddi bir kümelenmenin olduğu tespit edilmiştir. Bu konuda incelenen çalışmalardan en fazla atıf alan çalışmalardan bir tanesinde tarla bitkilerinin büyüme ve gelişimini yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlikle izlemek için, üç boyutlu hareket edebilen, sabit raylara monte edilmiş tam otomatik bir robotik fenotipleme platformu geliştirilmiş ve çeşitli sensörlerle bitki performansı yoğun şekilde izlenmiştir (Virlet ve ark., 2017). Başka bir çalışmada ise hassas tarımda mahsul izleme ve güvenlik için düşük maliyetli, enerji tasarruflu ve video gözetim özelliklerini entegre eden bir WSN (Kablosuz Sensör Ağı) platformu/otomasyonu geliştirilmiş, bu platformun enerji tüketimi, çerçeve çakışma olasılığı ve uçtan uca gecikme açısından etkinliği simülasyon ve saha testleriyle doğrulanmıştır (Garcia-Sanchez ve ark., 2011). Benzer şekilde seralarda marul bitkilerinde kalsiyum eksikliğini, insan gözüyle görülebilir belirtilerden bir gün önce tespit edebilen, bitki morfolojik, renk ve doku özelliklerini analiz eden bir makine görüş sistemine dayalı otomatik izleme ve algılama yöntemi robotik olarak geliştirilmiştir (Story ve Ark., 2010).

Milella ve ark. (2024), hizmet olarak robotik (RaaS- Robotics as a Service) yaklaşımının hassas tarımda yeni bir paradigma olarak nasıl uygulanabileceğini ATLAS projesi çerçevesinde incelemiştir. Tarımda robotik ve çoklu sensör teknolojilerinin yaygınlaşmasına rağmen, üreticiye özgü kapalı sistemler ve birlikte çalışabilirlik eksikliği, sistemlerin esnek uyarlanması ve bilgi paylaşımını zorlaştırmaktadır. Bu sorunu çözmek üzere

geliştirilen ATLAS projesi, sensör sistemleri, makineler ve veri analiz araçları arasında açık ve dağıtık bir birlikte çalışabilirlik ağı sunmaktadır. Çalışmada, bağ bozumu alanlarında bitki ölçekli izleme yapan RGB-D ve konumlandırma sensörleriyle donatılmış yenilikçi bir tarım robotu tanıtılmış, bu robotla entegre çalışan yazılım bileşenleri aracılığıyla renk ve derinlik verileri kullanılarak bitki örtüsü indeksleri ve morfolojik parametrelerin ölçüldüğü bir hizmet sunulmuştur. Sistem, iki farklı bağda test edilerek ATLAS ağına başarıyla entegre edildiği gösterilmiştir. Modüler yapısıyla çoklu robot yapılandırmalarına ve diğer hassas tarım uygulamalarına (örneğin meyve sayımı, seçici gübreleme ve hasat) kolayca uyarlanabilmektedir. ATLAS ile geliştirilen bu teknoloji, geleneksel tarım ortamlarında robot kullanımını mümkün kılarak, genç ve teknolojiye yatkın kuşakları tarıma çekmeyi hedeflemekte ve nitelikli iş gücü eksikliğine karşı çözüm sunmaktadır (Milella ve ark., 2024). Wei ve ark. (2024), tarımsal alanlarda otonom veri toplama ve izleme amacıyla geliştirilen mobil bir kara robotunu tanıtmıştır. Robot, GPS, IMU ve tekerlek enkoderlerinden gelen verileri birleştiren genişletilmiş Kalman filtresi ile hassas konumlandırma sağlamakta ve yönlendirme için yapay elektrik potansiyel alanı temelli yeni bir yöntem kullanmaktadır. Dört tekerlekli yapıya entegre edilen sistem, geleneksel Nav2 algoritmasına kıyasla daha hızlı veri işleme performansı göstermiştir. Robot, tarla sıralarında otonom şekilde hareket ederken RGB ve derinlik görüntüleri toplayabilmekte, bu da sistemin tarımsal izleme için etkinliğini ortaya koymaktadır. Kullanıcıların hedef bölgeleri tanımlamasını ve robotu gerçek zamanlı izlemesini sağlayan grafik arayüz de geliştirilmiştir. ROS2 (Robot Operating System 2) tabanlı mimari ile çalışan sistem, tekli robot uygulamalarının ötesinde çoklu robot yapılarına genişletilmek üzere planlanmış ve Unity arayüzleri ile birlikte değerlendirilmiştir (Wei ve ark., 2024).

Çalışmalar ve rapor incelendiğinde otomasyon ve robotik açısından 2010-2015 yılları arasında, GPS ile otomatik yönlendirme teknolojisi ve lazer/kızılötesi sensörlerin kullanımı öne çıkmıştır. Bu dönemde, çiftçiler tarımsal araçları daha hassas şekilde yönlendirebilmek için GPS teknolojilerinden yararlanmaya başlamışlardır. Ayrıca lazer ve kızılötesi sensörler, tarım makinelerine entegre edilerek daha verimli bir çalışma sağlamıştır. Bu teknolojiler, tarımsal süreçlerin doğruluğunu artırmış ve operasyonel hataları en aza indirmiştir. 2015-2020 yılları arasında, hassas tarım verim haritaları ve değişken oranlı uygulamaların yanı sıra hasat makineleri ve tarımsal aletler için otomatik makine ayar optimizasyonu yapılmaya başlanmıştır. Bu dönemde tarımsal verimliliği artırmak için makinelerin verileri analiz edip kendilerini optimize etme yeteneği gelişmiştir. Özellikle değişken oranlı uygulamalar sayesinde gübreleme, sulama ve ilaçlama gibi işlemler daha verimli hale gelmiş ve kaynak kullanımı optimize edilmiştir. 2020-2025 yılları arasında ise otonom tarım makineleri devreye girmeye başlamaktadır. Bu makineler, herhangi bir insan müdahalesine gerek duymadan tarımsal işlemleri gerçekleştirebilecek şekilde programlanmaktadır. Otonom tarım makineleri, tarlada tamamen kendi kendine çalışan sistemler olarak tarımda büyük bir dönüşüm sağlayacaklardır. Bu teknoloji, iş gücü sorunlarını çözmekte ve tarımsal süreçlerin daha etkin, hızlı ve düşük maliyetle yönetilmesine imkan tanımaktadır.

Ürün izlenebilirliği açısından değerlendirildiğinde, 2010-2025 yılları arasındaki teknolojik gelişmeler, tarım sektöründe izlenebilirliğin etkinliğini önemli ölçüde artırmıştır. 2010-2015 yılları arasında GPS ile otomatik yönlendirme teknolojisi ve lazer/kızılötesi sensörlerin kullanımı, tarımsal faaliyetlerin daha hassas ve doğru bir şekilde yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu, tarla ve ürün yönetimi süreçlerinde daha doğru verilerin elde edilmesi ve bu verilerin izlenebilirlik sistemlerine entegre edilmesi açısından büyük bir adım olmuştur. Lazer ve kızılötesi sensörlerle sağlanan veriler, ürünlerin yetiştirilme sürecinde hangi alanlarda ne tür işlemler yapıldığını daha net bir şekilde takip etmeye olanak tanımıştır. Bu sayede, üretim sürecinde hangi adımların atıldığına dair daha kapsamlı ve doğruluğu yüksek izlenebilirlik bilgileri elde edilmiştir. 2015-2020 yılları arasında, hassas tarım kapsamında verim haritalarının kullanımı ve değişken oranlı uygulamaların yaygınlaşmasıyla birlikte izlenebilirlik süreçleri önemli ölçüde gelişmiştir. Tarımsal makineler, analiz edilen veriler doğrultusunda çalışmaya başlayarak gübreleme, sulama ve ilaçlama gibi işlemleri değişken oranlı teknolojiyle daha hassas ve verimli şekilde gerçekleştirmiştir. Bu gelişmeler, ürünlerin yetiştirilme sürecindeki kaynak kullanımının izlenmesini ve her bir ürünün hangi çevresel ve tarımsal koşullar altında üretildiğinin daha ayrıntılı olarak takip edilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle otomatik makine ayarlarının optimize edilmesi sayesinde, üretim sürecinin tüm adımları sistematik biçimde izlenebilir ve belgelenebilir hale gelmiştir. 2020-2025 yılları ise otonom makinelerin tarımda devreye girmesiyle, izlenebilirlik açısından yeni bir dönemi başlatmıştır. Otonom makineler, insan müdahalesi olmadan ürün yetiştirme süreçlerini yönettiği için, her aşamanın dijital ortamda kaydedilmesi ve izlenmesi daha da kolaylaşmıştır. Bu makineler, hangi alanlarda hangi işlemlerin yapıldığını, ne kadar kaynak kullanıldığını ve ürünlerin hangi koşullarda yetiştirildiğini otomatik olarak raporlayabilmektedir. Bu durum, tarladan sofraya kadar tüm süreçlerin şeffaf

bir şekilde izlenebilmesine olanak tanıyarak, tüketicilere güvenli ve sürdürülebilir gıda sağlama açısından büyük avantajlar sunmaktadır.

Görüntüleme ve Sensörler

Yapılan bibliyometrik araştırmada en büyük kümelenmenin bu alanda olduğu tespit edilmiştir. Hatta HLS (Uyumlaştırılmış Landsat ve Sentinel) veri setinin tarımsal ürün izleme gibi uygulamalarda yüksek potansiyel sunduğu vurgulanmış ve bu konuda örnek zaman serileri sunulan çalışma (Claverie ve ark., 2018) en çok atıf alan çalışmadır. İkinci atıf oranı yüksek çalışmada ise tarımsal ürün izleme için Sentinel-1 ve benzer optik verilerle farklı ürün türlerinin uzaktan algılama sinyallerindeki zamansal değişimleri analiz ederek, özellikle Sentinel-1'in VH/VV (vertical-horizontal/vertical-vertical) oranının potansiyelini vurgulamaktadır (Veloso ve ark., 2017). Üçüncü çalışmada yazarlar arpa yetiştiriciliğinde İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü RGB görüntülerinden türetilen bitki verilerini kullanarak biyokütle tahmini yöntemlerini değerlendirip tarımsal uygulamalarda potansiyelini ortaya koymuşlardır (Bendig ve ark., 2014). Diğer bir çalışmada ise tarımsal üretimi artırırken çevresel etkileri azaltmayı hedefleyen hassas tarım uygulamalarında, uydu görüntüleme, İHA'lar, büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi teknolojilerin kullanımını ve bunların güncel uygulamalarını kapsamlı bir şekilde inceleyerek, uzaktan algılamanın daha geniş ölçekli benimsenmesi için basit ve güvenilir iş akışlarının geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır (Sishodia ve ark., 2020). Çalışmalar ve rapor incelendiğinde görüntüleme ve sensörler açısından, 2010-2025 yılları arasında teknolojinin gelişimi üç ana dönemde incelenmektedir. 2010-2015 yılları arasında hava görüntüleme (uydu ve İHA) ve temel ürün durumu sensörleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojiler, tarla genelinde genel veriler sağlamıştır. 2015-2020 döneminde, toprak koşullarının ölçümü ve daha gelişmiş ürün durumu sensörleri kullanılmaya başlanmış, bu sensörler toprak ve bitki sağlığı hakkında daha detaylı bilgi sunmuştur. 2020-2025 yılları arasında ise çok işlevli İHA'lar ve makine üstü toprak durumu sensörleri gibi daha gelişmiş sistemler devreye girmiştir. Bu sistemler, bitki ve toprak sağlığına dair daha hassas ve gerçek zamanlı veriler sağlayarak tarımın verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Tarımda uzaktan algılama ve görüntüleme teknolojileri, tarlaya fiziksel olarak erişim gerektirmeden ürün veya arazi durumunun izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji toprak nemi, sıcaklık, besin durumu, sıkışma ve stres gibi çeşitli tarımsal parametrelerin belirlenmesinde etkili bir araç olarak kullanılmaktadır (Karmakar ve ark., 2024). Uydu, İHA ve yersel kameralar aracılığıyla elde edilen görüntüler sayesinde çiftçiler, sahaya sensör yerleştirmeden ürün gelişimini uzaktan takip edebilmekte ve belirli alanları detaylı olarak analiz edebilmektedir (Olson ve Anderson, 2021). Bu görüntüler, gelişmiş analiz yazılımları ile işlenerek ürün stresinin yeri, yayılımı ve nedenleri hakkında bilgi sunmaktadır. Uzaktan algılama sistemleri aynı zamanda ürün ve toprak değişkenliğini haritalamak, verim haritaları oluşturmak ve zararlı ya da hastalık kaynaklı sorunları tespit etmek gibi işlevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayede tarım girdilerinin optimize edilmesi sağlanmakta; verimlilik artışı ve çevresel etkilerin azaltılması gibi sürdürülebilir üretim hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Ancak bu teknolojilerin sağlıklı şekilde uygulanabilmesi için cihaz kalibrasyonu, atmosferik düzeltmeler ve görüntü işleme gibi teknik süreçlerin dikkatle yürütülmesi gerekmektedir. Güvenilir ve anlamlı sonuçlar elde etmek adına gelişmiş veri işleme tekniklerinin kullanımı kaçınılmazdır. Bu aşamada ise yapay zeka ve veri analitiği kavramları devreye girmektedir (Javaid ve ark., 2023). Uydu görüntüleme veya uzaktan algılama, ürünlerin biyofiziksel parametrelerini haritalamak için kullanılan çok bantlı bir görüntüleme tekniğidir. Hava araçları, bitki örtüsü miktarını ölçerek ekinleri yabancı otlardan ayırt edebilmekte ve bu veriler CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) yazılımı yardımıyla haritalara dönüştürülebilmektedir. Bu teknoloji, geniş alanlarda tarla ve ürün durumunu neredeyse gerçek zamanlı olarak izlemek için değerli bilgiler sunmaktadır. Ancak, verilerin güvenilirliği ve zamanında teslimi hala önemli bir endişe kaynağıdır. Uydu görüntüleme, karmaşık dijital sensörler sayesinde dünya yüzeyini hızlı ve kaliteli bir şekilde tarayabilmektedir. Klorofilin radyasyonu emmesini ölçen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gibi analiz yöntemleri, gübre ve su gibi girdilerin yönetilmesi ile ürün verimi tahmini için kullanılmaktadır. Bu analizler, çiftçilerin tarım faaliyetlerini optimize etmelerine ve gelecekteki üretimi planlamalarına yardımcı olmaktadır (Wu ve ark., 2015). İHA'lar, tarımda maliyetleri azaltma ve değişken oranlı uygulamalarda daha hassas veri sağlama avantajları sayesinde ürün izleme amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerle çiftçilerin tarlayı fiziksel olarak gezip veri toplaması günler sürebilirken, İHA'lar kısa sürede geniş alanların yüksek çözünürlüklü görüntülerini toplayarak önemli bir zaman ve emek tasarrufu sağlamaktadır. Elde edilen bu görüntüler, görüntü işleme yazılımları ve analiz sistemleri aracılığıyla işlenerek bitki sayımı, bitki boyutu ve tarladaki stresli alanların ya da sorunlu bölgelerin tespiti gibi çıktılara dönüştürülmektedir (Cuaran ve Leon, 2021). İHA'lar, bitki homojenliğini ve verimini

erken aşamada tespit edebilme yeteneğine sahiptir. Hiperspektral kameralar ve görüntüleme sensörleri ile donatılan bu cihazlar, çiftçiler tarafından kiralanabilmekte veya satın alınabilmektedir. İHA'dan çekilen görüntüler, bulut tabanlı yazılım çözümleri yardımıyla düzeltme işlemine tabi tutularak tek bir perspektif sunacak şekilde birleştirilebilmektedir. Bu işlem sonucunda coğrafi referanslı haritalar oluşturulabilmekte ve yabancı ot tespiti, ürün sağlığı izleme, hasat izleme ve verim tahmini gibi görevler için kullanılabilir.

Yersel sensörler, ürün ve tarla verilerini toplamak amacıyla kullanılan uzaktan algılama cihazlarıdır. Bu sensörler, el tipi cihazlara entegre edilebildiği gibi tarım makinelerine monte edilerek de kullanılabilir. El tipi sensörler; besin düzeyi, toprak yapısı ve iklim koşullarını ölçmeye yönelik farklı kategorilere ayrılmaktadır. Toprak nemi, sıcaklık ve besin maddeleri gibi kritik tarımsal parametreleri sahadan doğrudan ölçen bu sensörler, uydu tabanlı sistemlere kıyasla hem daha uygun maliyetli hem de uygulamaya özel esnek çözümler sunmaktadır (Ali ve ark., 2022). Bu nedenle özellikle verim izleme ve toprak haritalama gibi ürün izleme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Yer tabanlı sensörlerin kullanım kolaylığı ve teknik bilgi gereksiniminin az olması, çiftçiler açısından erişilebilirliğini artırmaktadır. Öte yandan telemetri teknolojileri de giderek önem kazanan bir alan olmaya başlamıştır. Tarımda telemetri teknolojileri, tarla ekipmanlarından gerçek zamanlı veri toplanmasını, bu verilerin kablosuz ağlar ya da uydu sistemleri aracılığıyla bulut tabanlı platformlara iletilmesini ve sonrasında analiz edilerek anlamlı bilgilere dönüştürülmesini sağlayan entegre bir sistemdir. Bu sistem sayesinde; traktör, biçerdöver ve ilaçlama makineleri gibi ekipmanların çalışma saatleri, konum bilgileri, hızları, yakıt tüketimleri ve mekanik durumları uzaktan izlenebilmektedir. Özellikle hassas tarım uygulamalarında, telemetri aracılığıyla toplanan veriler, makinelerin operasyonel verimliliğini artırmak, bakım süreçlerini planlamak, enerji tüketimini azaltmak ve karar destek sistemlerini güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Araştırmalar, bu teknolojilerin tarımsal otomasyonun önemli bir bileşeni haline geldiğini ve dijital tarımın temel taşlarından biri olarak değerlendirildiğini göstermektedir. (Marques ve ark., 2022).

Büyük veri ve Veri Analitiği

Tarımda büyük veri platformları, tarımsal faaliyetlerden çeşitli teknolojiler ile elde edilen verileri toplayan, işleyen ve analiz eden dijital sistemlerdir. Bu platformlar, çiftçilerin ve tarımsal işletmelerin toprak, hava koşulları, ürün durumu, sulama, gübreleme, zararlı izleme gibi çeşitli alanlardan veri toplayarak daha bilinçli kararlar almalarına yardımcı olmaktadır. Büyük veri, uydu görüntüleri, sensörler, hava durumu verileri, traktör ve diğer tarım makinelerinden gelen telemetri verileri gibi kaynaklardan sağlanmaktadır. Büyük veri platformları ayrıca tedarik zinciri yönetimi ve izlenebilirlik açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Ürünlerin çiftlikten sofraya kadar izlenmesini sağlayarak, tarımsal üretimde şeffaflığı artırır ve gıda güvenliği sorunlarını çözmeye yardımcı olmaktadır (Chergui ve Kechadi, 2022). Çiftçiler, tedarik zincirindeki her adımı izleyerek, hangi aşamada ne tür işlemler yapıldığını kayıt altına alabilmektedir. Bu izlenebilirlik hem tüketicilere ürün güvenliği sağlamak hem de sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemektedir. Öte yandan tarımda veri analitiği, çeşitli kaynaklardan elde edilen büyük miktarda tarımsal verinin toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesi sürecidir. Bu veriler arasında toprak sağlığı, hava durumu, ürün büyümesi, sulama düzeyleri, gübre kullanımı ve zararlı izleme gibi tarımsal faaliyetler yer almaktadır. Veri analitiği, bu verileri analiz ederek çiftçilere tarımsal süreçlerini optimize etmeleri için eyleme geçirilebilir bilgiler sunmaktadır. Tarımda veri analitiği, ürün verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Veri analitiği uygulamaları arasında verim tahmini, kaynak yönetimi (su, gübre ve pestisit kullanımı), toprak sağlığı analizi, iklim ve hava durumu tahmini, zararlı ve hastalık izleme ve hasat zamanlaması yer almaktadır. Bu uygulamalar, çiftçilere daha bilinçli kararlar alabilme imkanı sağlamaktadır. Örneğin, hava durumu verileriyle yapılan analizler, çiftçilere sulama ve gübreleme zamanlamasını optimize etme konusunda rehberlik edebilmektedir. Ayrıca, zararlıların ve hastalıkların erken tespiti ile verim kayıpları önlenmektedir. Veri analitiği sayesinde çiftçiler, maliyetleri düşürüp verimliliği artırarak hem ekonomik hem de çevresel fayda sağlayabilir.

Yapılan bibliyometrik araştırmada bu alanda düşük bir orada kümelenmenin olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde genellikle yapay zeka tekniklerinin ürün izlenebilirliği alanında kullanıldığı görülmüştür. Örneğin bir çalışmada araştırmacılar Landsat 8 OLI'den (Operational Land Imager) elde edilen NDVI zaman serileri kullanılarak mısır verim tahmini için ileri makine öğrenimi yöntemleri (BRT (Boosted Regression Trees), RFR (Random Forest Regression), SVR (Support Vector Regression), GPR (Gaussian Process Regression)) değerlendirilmiş ve BRT'nin üstün performans gösterdiği, RFR'nin ise verim tahmininde

en istikrarlı yöntem olduğu belirlenmiştir (Aghighi ve ark., 2018). Başka bir çalışmada ise Sentinel-1 radar verilerinin kullanımıyla pirinç boyu ve kuru biyokütle tahmini için makine öğrenimi yöntemleri (SVR, RFR, MLR (Multiple Linear Regression)) değerlendirilmiş, özellikle RFR yöntemiyle yüksek doğruluk sağlanarak Sentinel-1'in pirinç biyofiziksel parametrelerinin tahmininde etkili olduğu gösterilmiştir (Ndikumana ve ark., 2018). Görüleceği gibi bu alan henüz erken dönemini yaşamakta ve mevcut yapay zeka tekniklerinin alana uygulanması ve optimize edilmesi aşamasındadır.

Kum ve ark. (2024), geniş ölçekli akıllı tarım uygulamaları için bulut-yerel mimariye sahip bir yapay zeka platformu önermiştir. Derin öğrenme tabanlı analizlerin kırsal alanlardaki sınırlı bilişim kaynaklarıyla entegrasyonu zor olduğundan, önerilen yapı, uç kaynakları cihaz değil, yönetilebilir kaynaklar olarak ele almakta ve Kubernetes ile bu kaynakların entegrasyonunu sağlamaktadır. Sistem, yapay zeka uygulamalarının kapsayıcılar aracılığıyla dağıtımını, RESTful API'lerle kontrolünü ve kullanıcı dostu arayüzü üzerinden görsel yönetimini mümkün kılmaktadır. Kamera destekli gömülü sistemlerle test edilen platform, farklı çiftlik alanlarına ve ürünlere yönelik yapay zeka uygulamalarının kolayca konuşlandırılmasını, kaynakların paylaşılmasını ve hizmetlerin otomatik ölçeklenmesini desteklemektedir. Çilek tarlasında gerçekleştirilen ürün izleme senaryosu, sistemin bulut-uç sürekliliğinde dikey uygulamalara uygun olduğunu göstermiştir. (Kum ve Ark., 2024).

Ahmed ve ark. (2025), IoT tabanlı tarım uygulamalarında yapay zeka ve büyük veri teknolojilerinin bitki izleme süreçlerine entegrasyonunu incelemiştir. Çalışmada, görüntü sensörleri ile toplanan yaprak verileri, derin öğrenme ve akıllı hesaplama algoritmalarıyla işlenerek bitki hastalıklarının erken tespiti sağlanmıştır. Bu sistem, hastalık sınıflandırması, gerçek zamanlı uyarılar ve tarımsal karar destek önerileri sunarak sulama, ilaçlama ve gübreleme gibi uygulamaların optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Sağlıklı ve hastalıklı yaprakları sınıflandırmak için geliştirilen derin öğrenme modelinin %98 doğruluk oranı elde ettiği belirtilmiş, modelin veri kümesi ve parametreleri ayrıntılı biçimde doğrulanmıştır. IoT tabanlı akıllı tarım sistemlerinin kaynak verimliliğini artırdığı, çevresel etkiyi azalttığı ve sürdürülebilirliği güçlendirdiği vurgulanmıştır. Ayrıca, tarımda AI ve büyük veri uygulamalarının karşılaştığı gizlilik, güvenlik, birlikte çalışabilirlik ve kaynak yönetimi gibi zorluklara da değinilmiştir. (Ahmed ve ark., 2025).

Çalışmalar ve rapor incelendiğinde Büyük Veri ve Dijitalleşme kategorisinde 2010-2025 yılları arasındaki teknolojik gelişimleri şu şekilde incelenebilir. 2010-2015 döneminde, tarla verim haritaları kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu haritalar, tarımsal faaliyetlerin daha verimli hale getirilmesi ve kaynakların optimum kullanımı için önemli bilgiler sağlamıştır. Bu dönemde veri toplama ve işleme süreçleri henüz başlangıç aşamasında olup, verimlilik artışına odaklanılmıştır. 2015-2020 döneminde ise çok katmanlı saha haritaları ve veri analitiği ön plana çıkmış, bu sayede daha derinlemesine veri analizi yapılarak tarım süreçleri optimize edilmiştir. Veri platformları, çiftçilere daha doğru ve detaylı bilgi sunarak karar alma süreçlerini kolaylaştırmıştır. 2020-2025 yılları arasında ise artırılmış gerçeklik ve açık veri platformları gibi daha ileri dijital teknolojiler tarıma entegre edilmiştir. Son dönemlerde, verilerin daha erişilebilir ve kullanışlı hale gelmesiyle çiftçiler, tarımsal faaliyetlerinde daha etkin ve verimli bir yol izleme imkânına sahip olmuştur. Bu teknolojiler, tarımda dijitalleşmenin önemli bir aşamaya geldiğini göstermektedir.

Bu dijital dönüşüm süreci, tarım sektöründe dijital ikiz (digital twin) kavramının da giderek daha fazla önem kazanmasına neden olmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel bir tarım arazisinin veya tarımsal sürecin dijital bir kopyasının oluşturulması anlamına gelir. (van Dinter ve ark., 2022) Bu sistem; sensörler, uydu görüntüleme, IoT cihazları ve yapay zeka algoritmaları ile elde edilen veriler sayesinde, tarladaki anlık durumu dijital ortamda eş zamanlı olarak yansıtabilmektedir. Böylece çiftçiler, tarlada fiilen bulunmaksızın dijital model üzerinden sulama, gübreleme, ilaçlama ve hasat gibi kararları veri odaklı biçimde alabilmektedir. Dijital ikiz teknolojisi sayesinde geçmiş veriler analiz edilerek geleceğe yönelik tahminler yapılabilir; potansiyel riskler önceden tespit edilerek erken önlem alınabilir. Bu da üretim süreçlerinin daha verimli, sürdürülebilir ve izlenebilir hale gelmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, tarımda dijitalleşme yalnızca veri toplamayı değil, bu verilerle gerçek zamanlı ve dinamik karar destek sistemleri oluşturmayı da mümkün kılmakta ve dijital ikiz teknolojisi ise bu dönüşümün en ileri aşamalarından birini temsil etmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarımda dijitalleşmenin önemi, tarımsal üretimde verimlilik, sürdürülebilirlik ve karar verme süreçlerini optimize etme yeteneğinde yatmaktadır. Dijitalleşme, çiftçilerin tarım arazilerinden, ürünlerden ve çevresel

faktörlerden toplanan verileri daha hızlı ve doğru bir şekilde analiz etmelerini sağlar. Bu sayede kaynak kullanımı, ürün izleme, sulama, gübreleme ve hasat gibi kritik tarımsal faaliyetler daha verimli hale gelir. Dijital teknolojiler, özellikle büyük veri analitiği, yapay zeka, sensörler, İHA'lar ve IoT gibi araçlarla, çiftçilerin sahadaki gerçek zamanlı verilere dayalı olarak daha bilinçli kararlar almasına olanak tanır. Bu da hem üretim maliyetlerini düşürmekte hem de su ve enerji gibi kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, ürün izlenebilirliğini artırarak tedarik zincirindeki şeffaflığı güçlendirir ve tüketici güvenini artırır. Dijitalleşme, gıda güvenliği, iklim değişikliği ve kaynakların sürdürülebilir kullanımı gibi küresel tarımsal zorluklarla başa çıkmak için kritik bir rol oynamaktadır.

Ürün izlemenin önemi, tarımsal üretimin her aşamasının izlenebilir ve yönetilebilir olmasını sağlamasından gelmektedir. Çiftçiler, tedarik zincirindeki ürünlerin üretiminden tüketiciye ulaşmasına kadar olan süreci takip edebilmekte ve herhangi bir sorun veya aksaklık olduğunda hızlı bir şekilde müdahale edebilmektedirler. Bu izlenebilirlik, gıda güvenliği açısından büyük önem taşır; ürünlerin kaynağı, üretim koşulları ve hasat sonrası işlemleri hakkında detaylı bilgi sunarak tüketiciye güven vermektedir. Ayrıca, ürün izleme teknolojileri sayesinde hastalık, zararlı istilası veya iklimsel faktörler gibi sorunlar anında tespit edilerek verim kaybı ve maliyetler minimize edilebilir. Ürün izleme, sürdürülebilir tarım uygulamalarının geliştirilmesine de katkıda bulunmaktadır. Bu şekilde kaynak kullanımı optimize edilerek çevresel etkilerin azalmasına yardımcı olunmaktadır. Ürün izleme teknolojisi kapsamında birçok farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Teknoloji ilerledikçe bu yaklaşımlar farklılaşarak evrim geçirecektir.

Günümüzde algılama ve görüntüleme teknolojisi, 2019 yılında 1,5 milyar dolar olarak değerlendirilen ve 2025-2026 yıllarında 3,1 milyar dolara ulaşması beklenen ürün izleme pazarında en büyük paya sahip bulunmaktadır; söz konusu teknolojinin 2020-2025 yılları arasında %14,4'lük bir CAGR (Bileşik Yıllık Büyüme Oranı) ile artış göstermesi öngörülmektedir. Otomasyon ve robotik teknolojileri için ürün izleme pazarı ise 2019 yılında 226 milyon dolar olarak değerlendirilmiş olup, 2025 yılına kadar 539 milyon dolara ulaşması ve %17,8'lik bir CAGR ile büyümesi beklenmektedir. Algılama ve görüntüleme teknolojisi, bu alandaki hızlı gelişmeler ve tarımda İHA'ların yaygınlaşması sayesinde en büyük pazar payına sahip olmaya devam etmektedir. Değişken oranlı teknolojiler için ürün izleme pazarı ise 2019 yılında 398 milyon dolar olarak değerlendirilmiş olup, 2025 yılına kadar 898 milyon dolara ulaşması ve 2020-2025 döneminde %16,7'lik bir CAGR ile büyümesi öngörülmektedir. (Markets and Markets, 2020). Tüm bu veriler, yakın gelecekte ürün izleme teknolojilerinde farklı yazılım, donanım ve hizmet modellerinin ortaya çıkacağını göstermektedir. Özellikle sensörler ve görüntüleme teknolojileriyle biriken büyük verinin, veri analitiği teknikleriyle anlamlandırılması; bu geri bildirimlerin çiftçilere ya da otonom sistemlere iletilerek ürün izlenebilirliğinin yapay zeka ile entegre edilmesini mümkün kılmaktadır.

Ürün izlenebilirliği ileriki zamanlarda dijital ikize evrilecektir. Tarımda dijital ikiz, fiziksel bir tarım arazisinin veya tarımsal süreçlerin dijital ortamda oluşturulmuş sanal bir kopyasıdır. (Cesco ve ark., 2023). Bu teknoloji, tarlada olup bitenleri dijital bir model üzerinden takip etmeye, analiz etmeye ve optimize etmeye olanak sağlayacaktır. Dijital ikiz; sensörler, İHA'lar, uydu görüntüleri ve diğer veri toplama araçlarıyla sürekli veri akışı sağlayarak fiziksel ortamda meydana gelen değişiklikleri anında dijital modeline yansıtır. Bu teknoloji, ileride tarımda uygulandığında verimliliği artırmak için çiftçilere büyük avantajlar sunacaktır. Dijital ikiz, ürün sağlığını izlemek, gübreleme ve sulama stratejilerini optimize etmek, zararlıların yayılmasını önceden tahmin etmek gibi karar destek süreçlerinde kullanılabilir. Sonuç olarak, ürün izleme açısından tarımda dijital ikiz teknolojisi, daha verimli ve sürdürülebilir bir üretim sağlamada kritik bir rol oynayacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZAR KATKISI

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

ETİK BEYAN

Bu araştırma çalışması, araştırma ve yayınlama etiğine uygun bir şekilde yürütülmüştür. MJAVL'de yayınlanan makalelerin bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlara aittir. Bu makalede insan veya hayvan deneklerle herhangi bir çalışma bulunmaması nedeniyle etik onaya gerek duyulmamaktadır.

Etik Onay

Bu makalede insan veya hayvan deneklerle herhangi bir çalışma bulunmaması nedeniyle etik onaya gerek duyulmamaktadır.

KAYNAKÇA

- Aghighi, H., Azadbakht, M., Ashourloo, D., Shahrabi, H. S., ve Radiom, S. (2018). Machine Learning Regression Techniques for the Silage Maize Yield Prediction Using Time-Series Images of Landsat 8 OLI. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(12), 4563-4577. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2823361>
- Ahmed, I., Ahmad, M., Ghazouani, H., Barhoumi, W., ve Jeon, G. (2025). Intelligent Computing for Crop Monitoring in CIoT: Leveraging AI and Big Data Technologies. *Expert Systems*, 42(2), 1-14. <https://doi.org/10.1111/essy.13786>
- Ali, A. M., Abouelghar, M., Belal, A. A., Saleh, N., Yones, M., Selim, A. I., Amin, M. E. S., Elwesemy, A., Kucher, D. E., Maginan, S., ve Savin, I. (2022). Crop Yield Prediction Using Multi Sensors Remote Sensing (Review Article). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(3), 711-716. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.04.006>
- Aria, M., ve Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Aydın Eryılmaz, G., ve Kılıç, O. (2018). Türkiye’de Sürdürülebilir Tarım ve İyi Tarım Uygulamaları. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, 21(4), 624-631. <https://doi.org/10.18016/ksudobil.345137>
- Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., van der Wal, T., ve Gómez-Barbero, M. (2019). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, (80), 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., ve Bareth, G. (2014). Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395-10412. <https://doi.org/10.3390/rs6110395>
- Birner, R., Daum, T., ve Pray, C. (2021). Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4), 1260-1285. <https://doi.org/10.1002/aep.13145>
- Cesco, S., Sambo, P., Borin, M., Basso, B., Orzes, G., ve Mazzetto, F. (2023). Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability. *European Journal of Agronomy*, (146), 126809. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126809>
- Chergui, N., ve Kechadi, M. T. (2022). Data analytics for crop management: a big data view. *Journal of Big Data*, 9(1), 123. <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00668-2>
- Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J.-C., Skakun, S. V., ve Justice, C. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, (219), 145-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>
- Cuaran, J., ve Leon, J. (2021). Crop Monitoring using Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Agricultural Reviews*, 42(2), 121-132. <https://doi.org/10.18805/ag.R-180>
- Deichmann, U., Goyal, A., ve Mishra, D. (2016). Will digital technologies transform agriculture in developing countries? *Agricultural Economics*, 47(S1), 21-33. <https://doi.org/10.1111/agec.12300>
- Ennouri, K., Smaoui, S., Gharbi, Y., Cheffi, M., Ben Braiek, O., Ennouri, M., ve Triki, M. A. (2021). Usage of Artificial Intelligence and Remote Sensing as Efficient Devices to Increase Agricultural System Yields. *Journal of Food Quality*, (2021), 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/6242288>
- Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Hellmann Santos, C., ve Pekkeriet, E. (2020). Agricultural Robotics for Field Operations. *Sensors*, 20(9), 1-27. <https://doi.org/10.3390/s20092672>
- Garcia-Sanchez, A.-J., Garcia-Sanchez, F., ve Garcia-Haro, J. (2011). Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2), 288-303. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.12.005>
- Gomiero, T. (2019). Saving Food Production, Supply Chain, Food Waste and Food Consumption İçinde C. M. Galanakis (Ed.) *Soil and crop management to save food and enhance food security* (ss. 33-87). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815357-4.00002-X>
- Hasan, M., Uddin, K. N. W., Sayeed, A., ve Tasneem, T. (2021). Smart Agriculture Robotic System Based on Internet of Things to Boost Crop Production. *2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, 157-162. <https://doi.org/10.1109/ICREST51555.2021.9331091>
- Javaid, M., Haleem, A., Khan, I. H., ve Suman, R. (2023). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector. *Advanced Agrochem*, 2(1), 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001>
- Karmakar, P., Teng, S. W., Murshed, M., Pang, S., Li, Y., ve Lin, H. (2024). Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101093. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101093>

- Kum, S., Oh, S., ve Moon, J. (2024). Edge AI Framework for Large Scale Smart Agriculture. *27th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, 143-147. <https://doi.org/10.1109/ICIN60470.2024.10494451>
- Kumar, P., Singh, A., Rajput, V. D., Yadav, A. K. S., Kumar, P., Singh, A. K., ve Minkina, T. (2022). Bioinformatics in Agriculture Next Generation Sequencing Era İçinde P. Sharma, D. Yadav and R. K. Gaur (Ed.), *Role of artificial intelligence, sensor technology, big data in agriculture: next-generation farming* (ss. 625-639). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89778-5.00035-0>
- Le Mouél, C., ve Forslund, A. (2017). How can we feed the world in 2050? A review of the responses from global scenario studies. *European Review of Agricultural Economics*, 44(4), 541-591. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx006>
- Markets and Markets. (2020). *Crop Monitoring Market with Covid-19 Impact - Global Forecast to 2025*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/crop-monitoring-market-8994590.html> Erişim Tarihi: 19.05.2025
- Marques, L. S., Ferraz, G. A. e S., Moreira Neto, J., Magalhães, R. R., de Lima, D. A., Tsuchida, J. E., ve Fuzatto, D. C. (2022). Agricultural Machinery Telemetry: A Bibliometric Analysis. *AgriEngineering*, 4(4), 939-950. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040060>
- Milella, A., Rilling, S., Rana, A., Galati, R., Petitti, A., Hoffmann, M., Stanly, J. L., ve Reina, G. (2024). Robot-as-a-Service as a New Paradigm in Precision Farming. *IEEE Access*, 12, 47942-47949. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3381511>
- Ndikumana, E., Ho Tong Minh, D., Dang Nguyen, H. T., Baghdadi, N., Courault, D., Hossard, L., ve El Moussawi, I. (2018). Estimation of Rice Height and Biomass Using Multitemporal SAR Sentinel-1 for Camargue, Southern France. *Remote Sensing*, 10(9), 1394. <https://doi.org/10.3390/rs10091394>
- Olson, D., ve Anderson, J. (2021). Review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, imagery processing, and their applications in agriculture. *Agronomy Journal*, 113(2), 971-992. <https://doi.org/10.1002/agi2.20595>
- O'Sullivan, J. N. (2023). Demographic Delusions: World Population Growth Is Exceeding Most Projections and Jeopardising Scenarios for Sustainable Futures. *World*, 4(3), 545-568. <https://doi.org/10.3390/world4030034>
- Paul, K., Chatterjee, S. S., Pai, P., Varshney, A., Juikar, S., Prasad, V., Bhadra, B., ve Dasgupta, S. (2022). Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107096. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107096>
- Research And Markets. (2025). *Europe Precision Agriculture Market: Focus on Application, Product, and Country - Analysis and Forecast, 2024-2034*. <https://www.researchandmarkets.com/report/europe-precision-agriculture-market> Erişim Tarihi: 19.05.2025
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., ve Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Story, D., Kacira, M., Kubota, C., Akoglu, A., ve An, L. (2010). Lettuce calcium deficiency detection with machine vision computed plant features in controlled environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 238-243. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.010>
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2019). *On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023)*. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On-Birinci-Kalkinma-Plani-2019-2023.pdf> Erişim Tarihi: 19.05.2025
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)*. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani-2024-2028-11122023.pdf> Erişim Tarihi: 19.05.2025
- T.C. Kalkınma Bakanlığı. (2013). *Onuncu Kalkınma Planı (2014-2018)*. <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Onuncu-Kalkinma-Plani-2014-2018.pdf> Erişim Tarihi: 19.05.2025
- Torres-Torriti, M., ve Burgos, P. N. (2023). Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies İçinde Q. Zhang (Ed.), *Field Machinery Automated Guidance* (ss. 509-526). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_229
- van Dinter, R., Tekinerdogan, B., ve Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J.-F., ve Ceschia, E. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, 199, 415-426. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.015>
- Virlet, N., Sabermanesh, K., Sadeghi-Tehran, P., ve Hawkesford, M. J. (2017). Field Scanalyzer: An automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. *Functional Plant Biology*, 44(1), 143. <https://doi.org/10.1071/FP16163>
- Wei, Y., Lee, K., ve Lee, K. (2024). Autonomous Field Navigation of Mobile Robots for Data Collection and Monitoring in Agricultural Crop Fields. *21st International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 707-712. <https://doi.org/10.1109/UR61395.2024.10597470>
- Wu, B., Gommers, R., Zhang, M., Zeng, H., Yan, N., Zou, W., Zheng, Y., Zhang, N., Chang, S., Xing, Q., ve Van Heijden, A. (2015). Global Crop Monitoring: A Satellite-Based Hierarchical Approach. *Remote Sensing*, 7(4), 3907-3933. <https://doi.org/10.3390/rs70403907>

