

Tarla Bitkilerinde Kullanılan Akıllı Tarım Teknolojileri

Sedat SEVEROĞLU*

Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

Geliş Tarihi/Received: 30.06.2025

Kabul Tarihi/Accepted: 14.10.2025

ORCID ID

orcid.org/0000-0002-9164-6557

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: sedat.severoglu@atauni.edu.tr

Öz: Bu derlemede, tarla bitkileri üretiminde yaygın olarak kullanılan coğrafi bilgi sistemleri, uzaktan algılama, insansız hava araçları, değişken oranlı uygulama sistemleri, verim izleme teknolojileri, tarımsal robotlar, yapay zekâ, makine öğrenmesi, nesnelerin interneti ve dijital görüntü işleme gibi ileri teknolojiler ele alınmakta ve bu teknolojilerin tarımsal üretim süreçlerine sağladığı katkılar örnek uygulamalar aracılığıyla incelenmektedir. Tarım sektörü, artan küresel nüfus, iklim değişikliği, doğal kaynakların sınırlılığı ve girdi maliyetlerindeki artış gibi çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu bağlamda, üretimin sürdürülebilirliğini sağlamak ve kaynak kullanımını en verimli şekilde yönetmek amacıyla akıllı tarım teknolojilerinin entegrasyonu kaçınılmaz hâle gelmiştir. Mevcut bulgular, akıllı tarım teknolojilerinin verimliliği artırdığını, üretim maliyetlerini optimize ettiğini, çevresel etkileri ve iş gücüne olan bağımlılığı azalttığını göstermektedir. Ayrıca bu teknolojilerin, tarımsal karar destek sistemlerini güçlendirdiği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu üretim modellerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, tarla bitkileri yetiştiriciliğinde dijital dönüşümün gerekliliğini ortaya koymakta ve bu teknolojilerin yaygınlaşmasının tarımsal rekabet gücünü artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı tarım, coğrafi bilgi sistemleri, nesnelerin interneti, makine öğrenmesi, yapay zekâ

Smart Agricultural Technologies Used in the Field Crops

Abstract: This review discusses advanced technologies widely used in field crop production, including geographic information systems, remote sensing, unmanned aerial vehicles, variable rate application systems, yield monitoring technologies, agricultural robots, artificial intelligence, machine learning, the Internet of Things, and digital image processing. It examines the contributions of these technologies to agricultural production processes through practical applications. The agricultural sector faces various challenges such as the growing global population, climate change, limited natural resources, and increasing input costs. In this context, the integration of smart agricultural technologies has become inevitable to ensure the sustainability of production and to manage resource utilization in the most efficient way. Current findings indicate that smart agricultural technologies increase productivity, optimize production costs, and reduce environmental impacts as well as dependency on labor. Furthermore, these technologies strengthen agricultural decision support systems and contribute significantly to the development of production models aligned with sustainable development goals. The findings emphasize the necessity of digital transformation in field crop cultivation and demonstrate that the widespread adoption of these technologies has the potential to enhance agricultural competitiveness.

Keywords: Smart agriculture, geographic information systems, internet of things, machine learning, artificial intelligence

1. Giriş

Tarımsal gelişimin süreci incelendiğinde, ilk olarak insan ve hayvan gücüne dayalı geleneksel üretim yöntemlerinin uygulandığı “Tarım 1.0”

döneminden söz edilebilir (Friha ve ark., 2021). Sanayi devrimiyle birlikte bu dönem, “Tarım 2.0” (yeşil devrim) olarak adlandırılan mekanizasyon sürecine evrilmiştir. Bu dönemde traktörler, hasat

makineleri ve buhar gücü gibi teknolojik yenilikler devreye girmiştir. Ardından, “Tarım 3.0” dönemine geçilmiş; yüksek verimli tohumlar, gelişmiş gübreleme ve sulama teknikleri ile üretimde büyük artışlar sağlanmıştır. Günümüzde ise teknolojik ilerlemelerle birlikte “Tarım 4.0” (akıllı/dijital tarım) ve “Tarım 5.0” kavramları ön plana çıkmıştır. “Tarım 4.0” ile bilgisayarlar, sensörler, mikro işlemciler, uydular, bulut tabanlı iletişim ve bilgi teknolojileri tarımsal üretime entegre edilmiştir (İldırar ve Dalli, 2021). Tarım 5.0’da ise yapay zekâ, makine öğrenmesi ve robotik uygulamalar gibi daha ileri teknolojiler kullanılmaya başlanmıştır (Yaman ve ark., 2021).

Tarla tarımında, toprak işleme, tohum yatağı hazırlama, tohum seçimi, ekim, gübreleme, sulama, bakım, hasat, harman, depolama, pazarlama ile hastalık ve zararlılarla mücadele gibi süreçlerde, dijital tarımın sunduğu olanaklarla daha verimli ve kaliteli üretim yapılabilmektedir. Tarımsal üretim, birçok uzmanlık alanını gerektirdiği gibi iklim, toprak, çevresel kirlilik, hastalık ve zararlılar gibi kontrolü güç değişkenlere de bağımlıdır. Bu doğrultuda, kontrol edilemeyen durumlarda dahi uygun yetiştirme koşullarının oluşturulabilmesi, sürdürülebilir ve verimli bir üretim açısından önem arz etmektedir (Özgüven, 2023). Tarımsal işletmelerin başarısı, üretim sürecindeki değişimlerin zamanında ve doğru biçimde tespit edilmesine ile olası problemlere önceden müdahale edilmesine bağlıdır. Bu noktada, dijital (akıllı) tarım teknolojileri geleneksel yöntemlerin yerini almaktadır.

Akıllı tarım, ürün ve toprak yönetimini kolaylaştırarak kaynakların daha verimli kullanılmasını ve çevresel etkilerin en aza indirilmesini amaçlayan çağdaş bir üretim yaklaşımıdır. Bu sistem, tarımsal üretim alanında zaman ve konuma bağlı olarak değişen ihtiyaçlara uygun müdahale yöntemlerini belirleyerek, mekânsal ve zamansal farklılıklara duyarlı bir üretim modeli sunmaktadır. Akıllı tarım teknolojileri, bitkisel üretimin tüm aşamalarında (toprak işleme, ekim, hasat vb.) etkin biçimde kullanılabilmektedir. Bilgisayarlar, sensörler, uydular, iletişim ve bilgi kontrol sistemleri yardımıyla işletmelerin gelirlerinin artırılması, çevre kirliliğinin azaltılması, kaynak israfının önlenmesi ve çiftçi refahının yükseltilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, arıza tespitinin kolaylaşması, sistemlerin kendi durumunu izlemesi, sürdürülebilirlik, yüksek verimlilik, üretim esnekliği, maliyetlerin düşürülmesi ve yeni iş modellerinin geliştirilmesi gibi avantajlar sunmaktadır. Bu derlemede, tarla bitkileri üretiminde yaygın olarak kullanılan coğrafi bilgi sistemleri (CBS), uzaktan algılama (UA), insansız

hava araçları, değişken oranlı uygulama sistemleri, verim izleme teknolojileri, tarımsal robotlar, yapay zekâ, makine öğrenmesi, nesnelerin interneti ve dijital görüntü işleme gibi ileri teknolojiler ve bu teknolojilerin tarımsal üretim süreçlerine sağladığı katkıların örnek uygulamalar aracılığıyla incelenmesi amaçlanmaktadır.

2. Akıllı Tarım

Akıllı tarım, modern teknolojilerin tarımsal üretim süreçlerine entegrasyonu yoluyla düşük maliyetli üretimi, girdilerin optimum düzeyde kullanımını, yüksek verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği hedefleyen bütüncül bir yönetim yaklaşımıdır. Tarım arazilerinin fiziksel, kimyasal ve coğrafi özellikler bakımından heterojen bir yapıya sahip olması, toprak ve çevre koşullarındaki mekânsal ve zamansal değişkenlik, artan girdi maliyetleri ile çevresel baskılar, bu tür ileri düzey teknolojik yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymaktadır. Akıllı tarım, bu çerçevede, tarımsal girdilerin yalnızca gerekli miktarlarda ve doğru zamanlarda uygulanmasını sağlayarak, ekonomik verimliliği artırmayı ve çevresel yükü azaltmayı amaçlamaktadır.

Bu sistemde, sensörlerle donatılmış tarım makineleri ve tarla içi izleme sistemleri aracılığıyla; gübreleme, sulama ve ilaçlama gibi uygulamaların zamanı, yeri ve miktarına ilişkin ayrıntılı veriler toplanabilmektedir. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, üreticilere belirli alanlarda hangi tür gübrelerin hangi miktarlarda uygulanacağı, hava koşulları, bitki gelişim evreleri, mineral ihtiyaçları, toprak özellikleri ve zararlı popülasyonları gibi konularda kapsamlı bilgiler sunulmaktadır. Böylece üreticiler, tarımsal faaliyetlerini daha bilinçli bir şekilde yürüterek üretim maliyetlerini düşürmekte, çevresel etkileri en aza indirmekte ve ürün kalitesinde standartlaşma sağlamaktadır.

Akıllı tarım teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte oldukça kapsamlı bir veri toplama ve analiz süreci başlamıştır. Bu veriler, üretim kararlarının daha isabetli bir şekilde verilmesini mümkün kılmakta ve tarımsal işletmelerde kayıtlı üretim sistemlerinin gelişimine katkı sunmaktadır. Hassas tarım uygulamalarının ekonomik etkinliğini etkileyen başlıca faktörler arasında işletme büyüklüğü, üretim deseni, mevcut altyapı koşulları ve teknolojiye adaptasyon düzeyi yer almaktadır. Bununla birlikte, kullanılan teknolojik araçların nitelikleri, toprak örnekleme sıklığı, uygulamalarda hedeflenen doğruluk düzeyi ve değişken oranlı uygulamaların hangi girdiler için kullanılacağı gibi etkenler sistemin maliyet yapısını doğrudan etkilemektedir.

Toprak hazırlığı, ekim, ilaçlama ve hasat gibi temel üretim işlemlerinde kullanılan makineler; elektronik sistemler, bilgisayar destekli kontrol mekanizmaları, Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS, Global Positioning System), CBS, UA teknikleri, mobil uygulamalar, verim izleme sistemleri ve değişken oranlı uygulama teknolojileriyle donatılarak daha akıllı hâle getirilmiştir. Bu teknolojik entegrasyon, daha az kaynak kullanımı ile daha yüksek verim elde edilmesini mümkün kılmakta; çevresel etkileri azaltarak tarımsal sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda geliştirilen teknolojik uygulamalar, akıllı tarım kavramı içerisinde değerlendirilmekte ve genellikle hassas tarım uygulamaları kapsamında ele alınmaktadır.

3. Akıllı Tarım Uygulamaları

3.1. Coğrafi bilgi sistemleri

Tarımda CBS, mekânsal veri yönetimi, analiz ve görselleştirme olanaklarıyla tarımsal üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde önemli bir araç hâline gelmiştir. Özellikle dağlık ve topoğrafik olarak karmaşık bölgelerde, doğal kaynakların haritalanması, kaynak yönetimi ve tarımsal karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde CBS teknolojisi kritik rol oynamaktadır (Sood ve ark., 2015). Gelişmekte olan ülkelerde artan gıda talebine bağlı olarak derinleşen gıda güvensizliği endişeleri, tarımda ileri teknolojilerin kullanımını zorunlu kılmıştır (Raihan, 2023). Bu bağlamda CBS, yalnızca tarımsal uygulamaların izlenmesini değil, aynı zamanda politika yapıcılarının ekonomik etkileri değerlendirmesini de mümkün kılmaktadır (Raihan ve Tuspekova, 2022; Boda ve ark., 2023). Küresel Konumlandırma Sistemi ve UA teknolojilerinin CBS ile entegrasyonu, hassas tarım uygulamalarının yaygınlaşmasına katkı sağlamış; bu sayede ürün verimliliğinde artış, alan bazlı ürün yönetimi ve tarımsal girdi kullanımının optimizasyonu mümkün hâle gelmiştir (Toscano ve ark., 2019).

Coğrafi bilgi sistemleri teknolojileri ürün verimi tahmini (Dhanaraju ve ark., 2022), toprak verimliliği değerlendirmesi (Özyazıcı ve ark., 2015, 2016), ürün desenlerinin analizi (Singha ve ark., 2020), kuraklık izleme (Hoque ve ark., 2021) ve bitki sağlığı yönetimi (Voumik ve ark., 2023) gibi çeşitli alanlarda etkin biçimde kullanılmaktadır. Uydu görüntüleri ve spektral indeksler kullanılarak yapılan çalışmalar, buğday, çeltik ve patates gibi temel tarla bitkilerinin verimliliğini başarıyla tahmin edebilmiştir (Al-Gaadi ve ark., 2016; Dengiz ve Özyazıcı, 2018; Memon ve ark., 2019; Hassan ve Goheer, 2021). Bu modeller, yalnızca bitki örtüsü indekslerini

değil; aynı zamanda toprak özellikleri, iklim değişkenleri, topoğrafya ve yönetim uygulamaları gibi birçok faktörü dikkate alarak verim belirleyicilerini kapsamlı biçimde ele almaktadır (Voumik ve ark., 2023).

Toprak verimliliğinin izlenmesi ve değerlendirilmesi de CBS teknolojileri sayesinde daha etkin bir hâl almıştır. Coğrafi bilgi sistemi tabanlı modeller, fiziksel, kimyasal ve biyolojik toprak özelliklerini mekânsal olarak analiz ederek sürdürülebilir toprak yönetimi için bilimsel temelli stratejiler sunmaktadır (Özyazıcı ve ark., 2014; Abdelfattah ve Kumar, 2015; Shokr ve ark., 2021). Bu sayede toprak kalitesi farklı mekânsal ölçeklerde değerlendirilebilmekte ve karar vericilere, planlamacılara ve çiftçilere rehberlik etmektedir (El-Seedy, 2019).

Ürün desenlerinin analizi, bitki-çevre etkileşimlerinin ve tarım sistemlerinin kapsamlı şekilde anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Coğrafi bilgi sistemi tabanlı web sistemleri, çiftçilere tarımsal verileri izleme ve karar destek süreçlerinde etkin biçimde kullanma imkânı sunmaktadır (Kumar ve Babu, 2016; Singha ve ark., 2020). Monokültür ve çoklu ürün sistemlerinin izlenmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesine ve sürdürülebilir tarım sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Richard ve ark., 2017; Bégué ve ark., 2018). Ancak bu sistemlerin etkinliği, kullanıcı katılımı ve sistemlere duyulan güven düzeyi ile doğrudan ilişkilidir (Avanidou ve ark., 2023).

Kuraklık koşullarının değerlendirilmesinde, CBS ve UA tabanlı mekânsal analizlerle kuraklık risk haritaları oluşturulmakta ve bu sayede bölgesel planlama ile müdahale stratejileri geliştirilmektedir (Hoque ve ark., 2021; Aziz ve ark., 2022). Özellikle Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI, Standardized Precipitation Index) ve Standartlaştırılmış Yağış-Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) gibi endeksler, kuraklık eğilimlerinin daha doğru ve kapsamlı biçimde analiz edilmesini sağlamaktadır (Ojara ve ark., 2022). Bu analizler, yalnızca biyofiziksel değil, aynı zamanda sosyoekonomik kırılganlıkların belirlenmesinde de önem arz etmektedir (Raihan ve Bijoy, 2023).

Zararlı ve hastalık yönetimi kapsamında, coğrafi bilgi sistemlerinin sunduğu mekânsal analiz olanakları, tarımsal hastalıkların erken teşhisi ve izlenmesinde değerli bilgiler sunmaktadır. Uydu ve hava sensörleri aracılığıyla bitki sıcaklıkları izlenebilmekte ve bu veriler stres koşullarının saptanmasında kullanılmaktadır (Yusupova, 2024). RGB kameralar ve çok bantlı

görüntüleme sistemleri, bitki hastalıklarının fizyolojik etkilerini analiz etmekte kullanılmakta, ancak bu sistemlerin yüksek maliyeti uygulama alanlarını sınırlamaktadır (Thomas ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2023). Buna rağmen, spektroskop gibi biyofotonik yöntemlerle, hastalıkların semptomlar gelişmeden önce tespit edilmesi mümkün olmuştur (Xie ve ark., 2015). Coğrafi bilgi sistemleri ve GPS ile entegre edilen bu teknolojiler sayesinde zararlı ve hastalık haritaları oluşturulmuş, böylece etkili müdahale stratejileri geliştirilebilmiştir (Roy ve ark., 2023).

3.2. Uzaktan algılama

Uzaktan algılama, gözlemlenen nesnelerle doğrudan fiziksel temas kurmadan, bu nesneler hakkında bilgi edinilmesini sağlayan bilimsel bir yöntemdir. Bu teknoloji, başta dünya olmak üzere gezegen yüzeylerinin ve atmosferlerinin hava araçları, uydular veya uzay araçları aracılığıyla izlenmesini kapsamaktadır. Elektromanyetik enerjinin yüzey materyalleri ve atmosferle etkileşimi (görünür ve görünmeyen dalga boyları dâhil) analiz edilerek bilgi üretilmektedir. Günümüzde UA, mekânsal, zamansal, spektral ve radyometrik çözünürlüklerdeki gelişmeler sayesinde, doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimi ve tarımsal üretkenliğin artırılması açısından stratejik bir araç hâline gelmiştir.

Coğrafi bilgi sistemleri ile entegre biçimde kullanıldığında UA, doğal kaynakların korunması ve yönetimi konusunda karar vericilere bölgesel, ulusal ve yerel düzeylerde önemli katkılar sunmaktadır. Tarımsal üretimin verimliliği, girdi yönetimi, bitki hastalıklarının erken teşhisi, sulama planlaması ve afet yönetimi gibi pek çok alanda etkin uygulamalara olanak tanımaktadır. Özellikle bazı verilerin geniş coğrafi alanlarda sistematik olarak toplanabilmesi, yer bazlı ölçümlerde karşılaşılan örnekleme yanlışlıklarını azaltmaktadır. Ayrıca, zor erişilen bölgelerden bilgi toplanabilmesi ve çok disiplinli biyofiziksel verilerin üretilebilmesi, bu teknolojinin tarım başta olmak üzere birçok sektörde yaygınlaşmasını sağlamıştır (Casady ve Palm, 2002).

Uzaktan algılamanın tarımsal üretimdeki kullanımı zaman içerisinde önemli bir evrim geçirmiştir. Siyah-beyaz hava fotoğrafları ile başlayan süreç, günümüzde multispektral ve hiperspektral sensörler aracılığıyla çok daha yüksek mekânsal ve spektral çözünürlükte veri toplanmasına imkân tanımaktadır. Bitki örtüsü, toprak nemi, bitki sağlığı ve besin içeriği gibi parametreler, bu sensörlerden elde edilen yansımalarla değerlendirilebilmektedir. Bu veriler; gübreleme, ilaçlama, sulama planlaması ve stres tespiti gibi hassas tarım uygulamaları açısından

büyük önem taşımaktadır (Barnes ve Baker, 2000; Méndez-Barroso ve ark., 2008). Söz konusu yöntemler, buğday (Tilling ve ark., 2007), çeltik (Stroppiana ve ark., 2009) ve mısır (Samson ve ark., 2000) gibi birçok tarla bitkisinin verim ve besin içeriklerinin izlenmesinde başarıyla kullanılmaktadır.

Jeoistatistik, görüntü analizleri, sınıflandırma algoritmaları ve yapay zekâ temelli yöntemler, uzaktan algılama verilerinin yorumlanmasında yaygın olarak kullanılan ileri teknikler arasında yer almaktadır. Uydu görüntüleri yalnızca tarımsal üretimi değil, aynı zamanda yaban hayatı yönetimi, su kaynaklarını izleme, otlatma yoğunluğunun sınıflandırması ve afetlerin mekânsal analizi gibi çok çeşitli alanlarda da değerli bilgiler sunmaktadır. Landsat ve Sentinel gibi uydulardan elde edilen veriler ürün tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmakta, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ve MSG-SEVIRI (Meteosat Second Generation-Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) gibi platformlardan elde edilen bilgiler ise yangın felaketlerinin izlenmesinde etkin rol oynamaktadır (Yang ve ark., 2003; Dlamini, 2009).

Folhes ve ark. (2009), uzaktan algılamanın tarımsal üretim süreçlerinde girdi optimizasyonu ve su kaynaklarının verimli kullanımı gibi konularda somut faydalar sağladığını ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, Riedell ve ark. (2004), zararlılarla enfekte olmuş bitkilerin tespitinde uzaktan algılamanın düşük maliyetli ve etkili bir yöntem olduğunu göstermişlerdir. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verileriyle yapılan araştırmalarda ise otlatma yoğunluğu ve biyokütle ölçümlerinde yüksek doğruluk elde edilmiştir (Kurtz ve ark., 2010). Öte yandan, iklim değişikliğinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerine yönelik çalışmalarda da bu teknolojiye yararlanılmaktadır. Bu yöntemle, artan sıcaklık ve karbondioksit düzeyleri, besin içeriklerinin değişimiyle birlikte değerlendirilmekte ve hayvan yemlerinin kalite analizleri yapılabilmektedir (DaMatta ve ark., 2010).

3.3. İnsansız hava araçları

İnsansız hava araçları, tarımsal üretimde devrim niteliğinde ilerlemelere olanak sağlayan yenilikçi teknolojiler arasında yer almaktadır. Multispektral ve hiperspektral sensörlerle donatılan bu sistemler; bitki sağlığı izleme, ürün verimliliği değerlendirme, kaynak yönetimi ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması gibi pek çok alanda etkin biçimde kullanılmaktadır. Nitekim Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen bir çalışmada, İHA'lar aracılığıyla tarlalarda zararlılar, hastalıklar ve besin eksikliklerinden

etkilenen bölgeler yüksek doğrulukla tespit edilmiş; böylece, ürün veriminde % 20'ye kadar artış sağlanmıştır (Zhang ve Kovacs, 2012). Benzer biçimde, buğday tarlalarında yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanılarak biyokütle, azot durumu ve tane verimi tahminleri başarıyla gerçekleştirilmiştir (Lelong ve ark., 2008). Hindistan'da meydana gelen bir sel felaketinin ardından, İHA'lar etkilenen tarım arazilerinin haritalanmasında kullanılmış; bu veriler, yardım dağıtımı ve yeniden ekim süreçlerinde stratejik planlama için temel oluşturmuştur (Jha ve ark., 2019).

Bitki sağlığını izleme amacıyla kullanılan İHA'lar, geniş alanlarda hızlı ve etkili veri toplayarak stres faktörleri, besin eksiklikleri ve zararlı istilaları erken aşamada tespit edebilmektedir (Cañadas ve ark., 2017; Khose ve Mailapalli, 2024; Wei ve Fang, 2024). Bu tür erken uyarı sistemleri, çiftçilere zamanında müdahale imkânı tanımakta; böylece hem girdi kullanımında azalma hem de verimlilikte artış sağlanmaktadır (Symeonaki ve ark., 2020; Velusamy ve ark., 2021). Örneğin, Hunt ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, kanola tarlalarında enfekte bitkiler İHA'lar yardımıyla tespit edilmiş ve fungusit uygulamaları hedefli biçimde yapılmıştır. Sonuç olarak, fungusit kullanımı % 30 oranında azaltılırken, ürün veriminde % 10 artış elde edilmiştir.

İnsansız hava araçlarının önemli avantajlardan biri de tarımsal girdilerin (pestisit, gübre ve herbisit) hassas ve optimize edilmiş biçimde uygulanabilmesidir (Tzounis ve ark., 2017; Song ve ark., 2024). Ayrıca, GPS ve otomasyon sistemleriyle entegre çalışan bu araçlar, kaynak kullanımında verimlilik sağlayarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunmaktadır (Abiri ve ark., 2023; Sahni ve ark., 2024). Japonya'da gerçekleştirilen uzun dönemli bir araştırmada, çeltik üretiminde İHA kullanımı iş gücü ihtiyacını % 50, pestisit kullanımını ise % 30 oranında azaltmış ve böylece çiftçilerin kâr marjı artmıştır (Huang ve ark., 2015). Ayrıca, İHA destekli toprak analizi, gübreleme ve ilaçlama uygulamaları genel maliyetlerde % 25'e varan bir azalma sağlamış; buna karşın, verimlilikte herhangi bir düşüş yaşanmamıştır (Lan ve ark., 2010).

İnsansız hava araçları, tarla haritalama süreçlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Topoğrafik özellikler, drenaj yapıları ve toprak değişkenliklerinin detaylı biçimde haritalanması; yüksek çözünürlüklü görüntüler ve entegre GPS sistemleri sayesinde mümkün hâle gelmektedir (Nex ve ark., 2022). Nitekim, Mulla (2013)

tarafından yürütülen bir çalışmada, multispektral görüntüler kullanılarak oluşturulan toprak haritalarıyla gübreleme stratejileri optimize edilmiş ve bunun sonucunda gübre verimliliği % 15, ürün verimi ise % 12 oranında artmıştır.

İlaçlama amacıyla kullanılan İHA'lar, özellikle geniş alanların hızlı ve homojen şekilde işlenmesine olanak tanımaktadır. Otomatik püskürtme sistemleri sayesinde hem kimyasal madde tüketimi hem de işçilik maliyetleri düşmekte; aynı zamanda insan sağlığına yönelik riskler azalmaktadır (Faiçal ve ark., 2014, 2017; Radoglou-Grammatikis ve ark., 2020). Wu ve ark. (2023) tarafından yürütülen bir çalışmada, İHA ile yapılan tarımsal mücadele uygulamalarında çalışan bireylerde, tarlada doğrudan temasla çalışanlara kıyasla cilt hastalıkları, solunum yolu rahatsızlıkları ve alerjik reaksiyonların daha az görüldüğü bildirilmiştir.

Ekim faaliyetlerinde de İHA'ların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Tohum serpme aparatları ve robotik kollarla donatılmış sistemler sayesinde, hassas ekim gerçekleştirilebilmekte, tohum kayıpları azaltılmakta ve toprak verimliliği artırılmaktadır. Hayvancılık faaliyetlerinde ise termal kameralarla donatılmış İHA'lar, hayvanların sağlık durumu, hareketliliği ve otlatma davranışlarının izlenmesinde kullanılmaktadır (Alonso ve ark., 2020; Ayamga ve ark., 2021). İspanya'da gerçekleştirilen bir uygulamada, İHA destekli izleme sistemleri sayesinde veterinerlik maliyetlerinde % 25, hayvan ölümlerinde ise % 20 oranında azalma sağlanmıştır (Alonso ve ark., 2020). Ayrıca bazı sistemler hem hayvan varlığını tespit edebilmekte hem de sınırları koruyarak tarım alanlarının yabani hayvanlardan zarar görmesini önleyebilmektedir. Böylece ürün kayıpları azaltılmakta, genel verimlilik artmaktadır (Katekar ve Cheruku, 2022).

Sulama yönetimi açısından da İHA teknolojisi önemli katkılar sunmaktadır. Termal ve multispektral kameralarla donatılmış drone'lar, su stresi ve toprak nemi gibi parametreleri hassas biçimde belirleyebilmekte; buna göre sulama stratejileri optimize edilmektedir (Khose ve Mailapalli, 2024). Nitekim, Hindistan'da yapılan bir çalışmada, termal görüntüleme ile tespit edilen toprak nemi farklılıkları doğrultusunda sulama düzenlenmiş; bu sayede, su tüketimi % 25 oranında azalırken çeltik verimi ise % 15 artmıştır (Das ve ark., 2021; Li ve ark., 2022). Berni ve ark. (2009) tarafından yürütülen bir başka çalışmada, bu teknolojilerin su tasarrufuna % 20'ye kadar katkı sağlayabildiği ortaya konmuştur. Öte yandan, iklim değerlendirmeleri bağlamında da İHA sistemleri, meteorolojik veri toplama ve ekstrem

hava olaylarının etkilerini haritalama amacıyla kullanılmakta, böylece tarımsal planlamalar daha esnek ve etkili hâle gelmektedir (Dandrifosse ve ark., 2024; Narayana ve ark., 2024).

Bitki sayımı ve çıkış analizi gibi karmaşık görevlerde Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini (LiDAR, Laser Imaging Detection and Ranging) ve yapay zekâ destekli İHA sistemleri kullanılmakta olup, bu teknolojiler % 97'ye varan doğrulukla analizler gerçekleştirebilmektedir (Nevavuori ve ark., 2020; Su ve ark., 2023). Özellikle mısır ve şeker kamışı gibi ürünlerde yapılan verim tahminlerinin oldukça başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Amarasingam ve ark., 2022; Bouguettaya ve ark., 2022; Kakarla ve ark., 2022). Ayrıca fide çıkışı ve toprak sıcaklığına bağlı çimlenme sorunları da bu sistemlerle önceden tespit edilebilmektedir (Awais ve ark., 2022). Yeni nesil İHA'lar, yapay zekâ ve uçtan uca veri işleme teknolojileri ile donatılmış olup, sahada elde edilen verileri anlık olarak analiz edebilmektedir. Bu gelişmeler, tarımsal uygulamaların çevikliği ve zamanında müdahale kapasitesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Nex ve ark., 2022; İftikhar ve ark., 2023; Quy ve ark., 2023; Khose ve Mailapalli, 2024).

3.4. Değişken oranlı uygulama (VRA, Variable Rate Application) teknolojisi

Geleneksel tarım uygulamalarında, tarla içerisindeki topoğrafya, toprak tipi, doku ve organik madde içeriği gibi mekânsal değişkenlikler dikkate alınmaksızın, tarımsal girdiler tüm araziye eşit oranlarda uygulanmaktadır. Bu yöntem, girdilerin ya yetersiz ya da aşırı biçimde kullanılmasına neden olmakta, dolayısıyla hem verim farklılıklarının ortaya çıkmasına hem de çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından olumsuz sonuçlara yol açmaktadır (Lark ve Stafford, 1997). Ancak son yıllarda akıllı tarım teknolojilerindeki ilerlemeler, özellikle VRA teknolojisi sayesinde, tarla içi mekânsal ve zamansal verim farklılıklarının daha etkin şekilde yönetilmesine olanak sağlamıştır. Bu sayede su, gübre ve diğer tarımsal girdiler (herbisit, pestisit vb.), bitki ya da yönetim birimi düzeyinde, yerinde ve hedefe yönelik olarak uygulanabilmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA, United States Department of Agriculture) tarafından yürütülen Tarımsal Kaynak Yönetim Anketi'ne göre, VRA teknolojisinin benimsenme oranı başlıca ürünlerde % 69 oranında artış göstermiştir. Ürün bazında bu oranlar; mısır için % 71, soya fasulyesi % 76, pamuk % 74, kışlık buğday % 68 ve sorgum için % 57 olarak bildirilmiştir (McFadden ve ark., 2023). Ayrıca, VRA teknolojisinin kullanımı pestisit uygulamalarında ekili alan oranını % 3.9'dan

% 8.6'ya, tohumlama oranını % 9'dan % 25.3'e, gübre ve kireç uygulamalarında ise % 8'den % 28.2'ye çıkarmıştır.

Değişken oranlı uygulama teknolojisi, üreticilere ve tarım danışmanlarına, tarla içerisindeki mekânsal heterojeniteye yanıt olarak, su, besin maddeleri ve kimyasallar gibi girdileri değişken oranlarda ve hassas biçimde uygulama imkânı sunmaktadır. Bu teknoloji tohumlama, sulama, gübreleme ve pestisit/fungisit uygulamaları gibi çeşitli tarımsal operasyonlarla entegre biçimde çalışabilmektedir. Uygulamada, VRA teknolojisi genellikle harita tabanlı uygulamalar ve sensör tabanlı uygulamalar olmak üzere iki temel yaklaşımla uygulanmaktadır. Uygun koşullarda her iki yaklaşım da ürün verimliliğinin artırılması, girdi ve işçilik maliyetlerinin düşürülmesi, tarımsal net gelirin yükseltilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli katkılar sunmaktadır (Campos ve ark., 2020).

Tarla içerisindeki toprak özelliklerinin mekânsal farklılıklarını değerlendirmek amacıyla jeoistatistiksel analiz tekniklerinden faydalanılmaktadır. Bu analizler, toprak özelliklerinin detaylı biçimde anlaşılmasını sağlarken, yere özgü yönetim stratejilerinin oluşturulmasına da olanak tanımaktadır (Brevik ve ark., 2016). Bu doğrultuda gerçekleştirilen yere özgü besin maddesi uygulamaları, hem toprak bozulmasının önlenmesine katkı sunmakta hem de ürün verimliliğini artırma açısından etkili sonuçlar vermektedir (Metwally ve ark., 2019; Shaheb ve ark., 2021). Tarım alanlarında, fiziksel ve kimyasal toprak özelliklerinin yerel ölçekte farklılık gösterdiği ve bu durumun sulama ile gübreleme gibi tarımsal uygulamalardan doğrudan etkilendiği bilinmektedir (Davatgar ve ark., 2012). Nitekim, Çin'de yürütülen saha temelli bir çalışmada, bu değişkenliğin etkin biçimde yönetilmesinin üreticiye önemli kazanımlar sağladığı ortaya konulmuştur (Wong ve ark., 2004).

Tarla verimliliğini etkileyen temel besin elementlerinden biri olan azot (N), toprak içerisinde oldukça hareketli ve dinamik bir yapıya sahiptir. Azotun toprakta hareketi, kayıp yolları ve bitki tarafından kullanılabilirliği, toprak özelliklerine ve yapılan tarımsal müdahalelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uzaktan algılama sistemleri ve CBS, bu değişkenliğin belirlenmesi, ölçülmesi ve haritalanması için etkili araçlar sunmaktadır. Değişken oranlı uygulama ile desteklenen N yönetimi, ürünün ihtiyaç duyduğu N miktarının hassas dozlarla uygulanmasını sağlayarak N kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Longchamps ve Khosla, 2015).

Nitekim, yeni tarihli bir araştırmada, yere özgü fosfor (P) ve potasyum (K) yönetimi sayesinde, geleneksel sabit oranlı uygulamalara kıyasla hedeflenen ürün veriminde kayıp yaşanmadan, hektar başına sırasıyla 21 kg P ve 30 kg K tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir (Yuan ve ark., 2022). Bu bağlamda, doğru ürünü, doğru yerde ve doğru oranda uygulama anlayışı, akıllı tarım uygulamalarının temel faydalarından biri olarak öne çıkmakta ve bu Değişken Oranlı Teknoloji (VRT, Variable Rate Technology) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

3.5. Verim izleme ve haritalama

Günümüzde modern biçerdöverler, standart olarak entegre edilen verim monitörleri sayesinde tahıl üretiminde kritik bir veri toplama aracı hâline gelmiştir. Bu sistemler, üreticilere hava koşulları, toprak özellikleri ve uygulanan tarımsal yönetim stratejilerinin ürün verimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde analiz etme olanağı sunmaktadır (Shearer ve ark., 2002). Shearer ve ark. (2002), verim monitörlerinin üç temel avantajına dikkat çekmektedir: Birincisi, operatörlerin hasat esnasında ürün performansını anlık olarak izleyebilmesidir. İkincisi, bu verilerin bilgisayar ortamına aktarılmasıyla tarla düzeyinde ya da tüm işletme genelinde kapsamlı özet analizlerin yapılabilmesidir. Üçüncüsü ise, coğrafi referanslı veriler yardımıyla oluşturulan verim haritalarıyla, yüksek ve düşük verimli alanların zamansal değişimlerinin karşılaştırılmasına imkân sağlanmasıdır. Ancak bu sistemlerin güvenilir ve geçerli sonuçlar üretebilmesi için doğru kurulumlarının yapılması, düzenli olarak kalibre edilmeleri ve uygun işletim prosedürlerinin titizlikle uygulanması gerekmektedir.

Toprak örnekleme ve laboratuvar analizleri, toprak sağlığına dair detaylı bilgi sunarken; verim monitörleri, ürün verimindeki mekânsal değişkenliğin anlaşılmasında kritik rol oynamaktadır (Khanal ve ark., 2018). Akıllı tarım yaklaşımları, tarla içerisindeki toprak ve ürünle ilgili mekânsal değişkenlikleri etkin bir şekilde yönetebilmek amacıyla veri temelli karar alma süreçlerine giderek daha fazla odaklanmaktadır. Bu çerçevede, verim haritaları, tarımsal arazi yönetiminin temel unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Verim haritalama ve toprak örnekleme, akıllı tarım uygulamalarının başlangıç safhalarını oluşturarak, sonraki hassas tarım uygulamalarına temel teşkil etmektedir. Verim izleme sistemleri, coğrafi koordinatlarla eşleştirilmiş ürün verilerinin elde edilmesini mümkün kılarak, ürün performansındaki değişkenliğin mekânsal düzlemde görselleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Verim haritalarının oluşturulmasında kullanılan başlıca interpolasyon teknikleri arasında mesafenin tersine ağırlıklı interpolasyon (Inverse Distance Weighting, IDW), kare mesafenin tersine dayalı yöntemler ve normal kriging gibi jeo-istatistiksel yöntemler yer almaktadır (Souza ve ark., 2016). Bu yöntemler, verim dağılımının detaylı analizini mümkün kılarak, yere özgü tarımsal yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

3.6. Tarımsal robotlar

Tarımsal üretimde karşılaşılan verimlilik, iş gücü ve çevresel sürdürülebilirlik sorunlarına çözüm sunmak amacıyla geliştirilen robotik ve otonom sistemler; tarım, ormancılık ve bahçecilik gibi birçok alanda önemli dönüşümleri beraberinde getirmiştir. Geleneksel tarım makinelerinin sınırlı operasyonel esnekliği ve insan iş gücüne olan yüksek bağımlılığı, araştırmacıları daha hassas, etkin ve sürdürülebilir üretim tekniklerinin geliştirilmesine yönlendirmiştir (Dursun ve Ozden, 2011). Bu bağlamda otonom traktörler, İHA'lar, ürün toplama robotları, hassas tohum yerleştirme makineleri ve robotik yabancı ot kontrol sistemleri gibi ileri teknolojilere dayalı araçlar geliştirilmiştir. Söz konusu teknolojiler, tarla hazırlığından hasada kadar üretim sürecinin tüm aşamalarında görev alarak yalnızca iş gücü ihtiyacını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda üretim sürecinin daha tutarlı, izlenebilir ve çevre dostu bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır (Pedersen ve ark., 2008).

Tarımsal robotik sistemlerin temel amacı, üretim yönetimini bitki düzeyinde optimize etmektir. Bu doğrultuda geliştirilen yüksek hassasiyetli tohum yerleştirme mekanizmaları, sıfır zemin hızı prensibiyle çalışarak tohumun toprakla temasından sonra kaymasını önlemekte ve homojen bitki gelişimi sağlamaktadır (Griepentrog ve ark., 2005). Ayrıca, bitki gelişimini izlemek ve hastalıkların erken teşhisini gerçekleştirmek amacıyla biyosensör teknolojileri sistemlere entegre edilmiştir (Tothill, 2001). İnsan gücü ile gerçekleştirilen yabancı ot temizleme işlemleri de lazer tabanlı sistemlerle otomatikleştirilmiştir. Bu sistemlerde kullanılan odaklanmış kızılötesi ışınlar, hedeflenen hücre yapısını bozarak istenmeyen bitkileri etkili bir biçimde yok etmektedir (Griepentrog ve ark., 2005). Bilgisayar tabanlı kontrol mekanizmaları sayesinde bu sistemlerin doğruluk düzeyi artarken, çevresel etkiler en aza indirilmektedir.

Bu teknolojik dönüşümün önemli bir parçası da otonom sulama sistemleridir. Çevresel koşulları izleyerek çalışan bu sistemler, su kullanımını optimize etmekte ve her bir bitkinin su ihtiyacını bireysel olarak karşılayacak esneklikle

tasarlanmaktadır. Böylece hem su kaynaklarının korunması sağlanmakta hem de ürün kalitesi artırılmaktadır. Diğer yandan, robotik tarım uygulamaları, gübre ve pestisitlerin yalnızca ihtiyaç duyulan bölgelere uygulanmasına olanak tanımakta; bu sayede, kimyasal kullanımının azaltılması ve toprak ile su kaynaklarının kirlenmesinin önlenmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, geleneksel ağır tarım makinelerinin aksine hafif yapıli araçların kullanılması, toprak sıkışmasının önüne geçerek toprak sağlığının korunmasına katkı sağlamaktadır (Talaviya ve ark., 2020).

3.7. Yapay zekâ

Yapay zekâ tabanlı teknolojiler, tarım sektöründe karşılaşılan çok yönlü sorunların çözümünde önemli rol oynamakta ve genel üretkenliğin artırılmasına katkı sunmaktadır. Ürün verimliliğinin artırılması, sulama yönetimi, toprak özelliklerinin analizi, ürün takibi, yabancı ot kontrolü ve bitki gelişiminin izlenmesi gibi pek çok alanda yapay zekâ destekli uygulamalar etkin biçimde kullanılmaktadır. Bu doğrultuda, yüksek katma değer yaratabilecek yapay zekâ uygulamalarının geliştirilmesi amacıyla, tarımsal robotlar ve otomasyon sistemleri tasarlanarak uygulamaya alınmıştır.

Dünya nüfustaki hızlı artış nedeniyle tarım sektörü yoğun bir üretim baskısı altına girmiştir. Bu baskının hafifletilmesinde yapay zekâ teknolojileri önemli bir çözüm potansiyeli taşımaktadır. Yapay zekâ temelli sistemler, çiftçilerin daha az girdi kullanarak daha yüksek verim elde etmelerine olanak sağlamakta, aynı zamanda ürün kalitesindeki artış sayesinde pazara erişim süreçlerini hızlandırmaktadır. Tahminlere göre, 2020 yılı itibarıyla tarım alanında yaklaşık 75 milyon bağlı cihaz kullanılmış olup, 2050 yılına gelindiğinde ortalama bir tarım işletmesinin günlük 4.1 milyon veri noktası üreteceği öngörülmektedir.

Yapay zekânın tarıma sağladığı katkılar arasında görüntü tanıma ve algılama sistemleri özel bir yer tutmaktadır. Yapay zekâ ve diğer ileri teknolojilerin hızlı gelişimi, bitki biyoteknolojisinin yeni bir düzeye evrilmesine olanak sağlamış (Aasim ve ark., 2024); otonom insansız hava araçları, geniş görüntüleme kapasiteleri ve esnek hareket yetenekleri sayesinde tarımsal izleme, hastalık teşhisi ve sulama planlaması gibi birçok uygulamada yaygın biçimde kullanılmaktadır (Tomic ve ark., 2012). Ayrıca, yapay zekâ teknolojileri sayesinde çiftçiler kamuya açık ve devlet destekli veri tabanlarından elde edilen büyük ölçekli verileri analiz ederek belirsizlik içeren birçok duruma ilişkin daha doğru

kararlar alabilmektedir. Bu durum, daha akıllı ve verimli sulama stratejilerinin uygulanmasına imkân tanıyarak ürün verimliliğini artırmaktadır.

Yapay zekâ uygulamalarının tarım sektörüne entegrasyonu, biyolojik bilgi ile ileri teknolojik yetkinliklerin kesişim noktasında yeni bir uzmanlık alanı doğurmuştur. Bu durum, çiftçilerin hem iş yükünü azaltmakta hem de ekonomik kayıplarını en aza indirmektedir. Birleşmiş Milletler'in öngörülerine göre, 2050 yılında dünya nüfusunun üçte ikisi kentlerde yaşayacak olup, bu demografik değişim tarımsal üretimde verimliliğin artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapay zekâ teknolojileri bu süreçte riskleri minimize ederek daha sürdürülebilir ve verimli bir akıllı tarım sistemine geçişi mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, tohum seçimi ve genetik çeşitlilik gibi alanlarda da yapay zekâ destekli sistemler önemli gelişmeler sunmaktadır. Yapay zekâ, farklı toprak ve iklim koşullarına uyum sağlayabilecek hibrit tohumların belirlenmesini kolaylaştırmakta, böylece hastalıklara karşı dayanıklı ve piyasa taleplerine uygun ürünlerin üretimi sağlanmaktadır (Talaviya ve ark., 2020). Son olarak, yapay zekâ destekli sohbet botları da çiftçilere anlık danışmanlık hizmeti sunarak üretim süreçleriyle ilgili sorularını yanıtlamakta, önerilerde bulunmakta ve karar alma süreçlerini desteklemektedir. Bu sanal asistanlar, doğal dil işleme (NLP, Natural Language Processing) teknikleriyle donatılmış olup, bilgiye erişimi kolaylaştırarak etkili bir bilgi paylaşım ortamı oluşturmaktadır.

3.8. Makine öğrenmesi

Makine öğrenmesi, tarım sektöründe akıllı tarım uygulamalarıyla entegre edilerek verimliliği artıran ve kaynak kullanımını optimize eden yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu teknoloji, toprak nem düzeyinin belirlenmesi, su yönetimi, hastalık teşhisi, pestisit seçiminde örüntü analizi ve genel bitki sağlığı yönetimi gibi pek çok alanda etkin biçimde kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2016; Goap ve ark., 2018; Bayrakdar, 2019). Tarımsal üretimde makine öğrenmesi genellikle veri toplama, veri depolama, veri ön işleme, model eğitimi ve modelin performans değerlendirilmesi olmak üzere beş temel aşamada uygulanmaktadır (Lin ve ark., 2019).

Veri toplama aşamasında, sıcaklık, toprak nemi, pH, ultraviyole, gaz ve nem sensörlerinin yanı sıra hiperspektral ve multispektral kameralar gibi çeşitli görüntüleme teknolojileri kullanılmaktadır (Krishna ve ark., 2017; Masrie ve ark., 2017). Bu cihazlar aracılığıyla çevresel koşullar, bitki sağlığı durumu ve toprak bileşimi

hakkında ayrıntılı veriler elde edilmektedir. Örneğin, bazı araştırmalarda çevresel değişkenleri izleyen robot sistemleri geliştirilmiş (Krishna ve ark., 2017), bazı çalışmalar ise optik dönüştürücüler kullanarak topraktaki besin elementlerini tespit etmeye odaklanmıştır (Masrie ve ark., 2017). Bununla birlikte, bu teknolojilerin yüksek maliyeti ve zaman alıcı veri toplama süreçleri, açık erişimli veri setlerinin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu veri setleri görsel, işitsel ve metinsel formatlarda sunulmakta; araştırma süresini ve maliyetini azaltırken, doğruluk açısından bazı sınırlılıklar içermektedir (Farooq ve ark., 2019). Bununla birlikte, hastalık tespiti ve bitki önerileri gibi çeşitli uygulamalarda bu veri setlerinin etkin biçimde kullanıldığı görülmektedir (Lin ve ark., 2019; Singh ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2019). Toplanan verilerdeki eksiklikler, tutarsızlıklar ve gürültüler analiz sürecini olumsuz etkileyebileceğinden, veri ön işleme aşaması oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Bu aşamada, eksik verilerin tamamlanması, veri normalizasyonu, gürültülerin filtrelenmesi ve boyut indirgeme gibi işlemler gerçekleştirilmektedir (Fleming ve Goodbody, 2019; Zhou ve ark., 2019). Özellikle görüntü tabanlı uygulamalarda filtreleme ve segmentasyon teknikleriyle gürültü giderimi sağlanmakta ve temel bileşenler analizi gibi yöntemlerle veri boyutu azaltılarak modelleme süreci optimize edilmektedir.

Veri işleme sürecinin ardından, denetimli ve denetimsiz öğrenme algoritmaları kullanarak model eğitimi gerçekleştirilmektedir. Bu algoritmalar toprak sınıflandırması, hastalık teşhisi, tür tanımlaması, su yönetimi, verim tahmini, ürün kalitesi değerlendirmesi ve yabancı ot tespiti gibi çok sayıda tarımsal uygulama alanında başarıyla kullanılmaktadır (Lin ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2019). Toprak sınıflandırmasında, fiziksel ve kimyasal özelliklerin analiz edilmesiyle en uygun ürün ve gübre seçimi yapılmakta ve destek vektör makineleri (SVM, Support Vector Machines) gibi algoritmalar bu alanda yüksek doğruluk oranları sunmaktadır. Bitki hastalıklarının teşhisinde yapay sinir ağları (ANN, Artificial Neural Networks) ve konvolüsyonel sinir ağları (CNN, Convolutional Neural Networks) gibi gelişmiş algoritmalar kullanılarak etkili tanımlama sağlanmaktadır (Lin ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2019). Bitki doku kültüründe sterilizasyon, rejenerasyon, kallus oluşumu ve sekonder metabolit üretimi gibi farklı süreçlerde ML ve ANN başarıyla kullanılmaktadır (Aasim ve ark. 2022). Tür tanımlama süreçlerinde, bitki türlerinin sınıflandırılmasına yönelik çeşitli öğrenme algoritmaları ve derin öğrenme

yaklaşımları başarıyla uygulanmaktadır (JayaBrindha ve Subbu, 2017). Su yönetiminde ise, sensör verilerine dayalı otomatik sulama sistemleri geliştirilerek su israfı azaltılmakta ve kaynak verimliliği artırılmaktadır. Verim tahmini, tarımsal üretim planlaması ve piyasa taleplerine uyum sağlanması açısından büyük önem taşımakta olup, doğrusal regresyon ve sinir ağları bu amaçla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Hasat sonrası ürün kalitesinin değerlendirilmesinde ise sensör donanımlı İHA'lar yardımıyla kalite izleme sağlanmakta ve kayıplar minimize edilmektedir. Ayrıca, yabancı otlar ve zararlı tespitinde SVM ve derin öğrenme tabanlı sınıflandırma (Yıldız ve Karabağ, 2025) teknikleri kullanılmaktadır.

3.9. Nesnelerin interneti

Kablosuz sensör ağlarındaki gelişmeler, farklı veri türlerinin ölçümünü kolaylaştırarak, nesnelerin interneti (IoT, Internet of Things) teknolojilerinin tarım alanında çeşitli sorunlara çözüm sunmasını sağlamıştır (Antony ve ark., 2020; Glaroudis ve ark., 2020). Nesnelerin interneti uygulamaları, tarımsal faaliyetlerin yönetimi, izlenmesi, kontrolü ve insansız makineler aracılığıyla gerçekleştirilmesi gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Talavera ve ark., 2017). Önceleri, çiftçilerin maliyet, fayda ve kârlılık analizlerine dayalı etkin yönetim araçları sınırlı iken, sensör ve iletişim teknolojilerindeki ilerlemelerle tarımsal verilerin toplanması ve kapsamlı yönetimi mümkün hale gelmiştir (Diène ve ark., 2020). Bu kapsamda, tarım makineleri için geliştirilen uzaktan izleme sistemleri, gerçek zamanlı takip ve operasyon kontrolü sayesinde üretkenliği artırmakta, makinelerin çalışma koşullarının ve saha durumunun izlenmesini sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2017). Ayrıca, IoT tabanlı çiftlik yönetim bilgi sistemleri, makine, tohum, pestisit ve gübre gibi unsurlara ilişkin verileri toplayarak büyük veri analizleri yardımıyla çiftçilere etkin karar destek mekanizmaları sunmaktadır (Paraforos ve ark., 2016; Köksal ve Tekinerdoğan, 2019). Bu tür sistemler, özellikle hassas tarım yönetiminde veri toplama, analiz ve üretim sürecinin kontrolü gibi fonksiyonlarıyla verimliliği artırmakta ve karar alma süreçlerini iyileştirmektedir. Tarımsal su yönetiminde ise, IoT tabanlı akıllı kontrol sistemleri su tüketiminin izlenmesi ve seviyelerinin kontrolü yoluyla önemli oranda su tasarrufu sağlamaktadır (Hadipour ve ark., 2020).

Tarımda izleme uygulamaları, hastalık, tarla koşulları, zararlılar ve toprak gibi çeşitli alanlarda yoğunlaşmıştır. Erken bitki hastalığı tespiti için geliştirilen bilişsel izleme sistemleri, çevresel sensör verilerini kullanarak salgın hastalıkların

ortaya çıkış koşullarını tahmin etmekte ve yapay zekâ tabanlı algoritmalarla kullanıcılara uyarılar göndermektedir (Khattab ve ark., 2019). Benzer şekilde, derin öğrenmeye dayalı bağlam füzyon ağları hastalık tanımda yüksek doğruluk oranlarıyla başarılı sonuçlar vermektedir (Zhao ve ark., 2020). Tarla izleme sistemleri ise, toprak nemi ve sıcaklığı gibi parametreleri düşük maliyetli sensörler aracılığıyla takip ederek veri tabanlı karar alma süreçlerine destek olmaktadır (Mohanraj ve ark., 2016). Zararlı yönetimi alanında otonom erken uyarı sistemleri geliştirilmiş ve bu sistemler, kablosuz iletişim protokolleri ile gerçek zamanlı uyarı göndererek pestisit kullanımının azaltılmasına katkı sağlamıştır (Liao ve ark., 2012). Toprak izleme ise pH, sıcaklık ve nem gibi parametrelerin IoT tabanlı sensörlerle takibini içerirken, bu veriler mobil uygulamalar aracılığıyla kullanıcıya sunulmakta ve sulama ile ilaçlama kararlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, toprak besin maddelerini izleyen ve gübreleme miktarını optimize eden IoT sistemleri hem verim hem de maliyet açısından çiftçilere önemli avantajlar sağlamaktadır.

Kontrol sistemleri kapsamında, IoT teknolojileri çiftlik ve sera ortamlarında kaynakların yönetimi ve optimizasyonu için etkin araçlar sunmaktadır. Çiftlik topraklarındaki temel besin maddeleri olan N, P ve potasyumun izlenmesi için geliştirilen sensör tabanlı sistemler, düzenli gübreleme önerileri sağlayarak tarımsal üretimin kalitesini artırmaktadır (Warpe ve Pippal, 2016; Lavanya ve ark., 2020). Sulama alanında ise, toprağın nem durumuna göre çalışan otonom sulama sistemleri, suyun verimli kullanımını sağlayarak aşırı sulamanın önüne geçmektedir (Muhammad ve ark., 2016; Chowdhury ve Raghukiran, 2017; Goap ve ark., 2018). Su kalitesinin yönetimi amacıyla geliştirilen IoT tabanlı pH kontrol sistemleri, belediye atık suyunun arıtılarak tarımda yeniden kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Khatri ve ark., 2018).

İnsansız makineler alanında, otonom tarım makineleri, gelişmiş sensör sistemleri ve GPS tabanlı otomatik yönlendirme teknolojileri kullanarak iş gücünü azaltırken verimliliği artırmaktadır (Zhang ve ark., 2018). Kablosuz iletişim teknolojilerinin gelişimiyle, birden fazla tarım makinesi veri alışverişi yaparak eşgüdümlü çalışabilmekte ve böylece tarımsal operasyonların etkinliği yükselmektedir. Diğer yandan, IoT tabanlı İHA'lar; tarımda sulama, gübreleme, hastalık yönetimi ve fenotipleme gibi birçok alanda ileri düzey veri toplama ve analiz yapabilmekte ve böylece geleneksel tarıma yenilikçi çözümler getirmektedir (Gao ve ark., 2020; Mukherjee ve ark., 2020; Boursianis ve ark.,

2022). Termal ve spektral kameralarla donatılmış İHA'lar, zararlı tespiti ve su stresi gibi kritik faktörlerin izlenmesine olanak sağlamaktadır. Ancak, güç kaynağı sınırlamaları, iletişim verimliliği ve iklim koşullarına bağlı uçuş kısıtlamaları gibi zorluklar halen çözüm beklemektedir. Özellikle bağımsız tarımsal İHA teknolojisinin geliştirilmesi birçok ülkede ithalata bağımlı kalmakta, bu durum yerli üretim ve yaygın kullanımın önünde engel teşkil etmektedir. Tüm bu gelişmeler doğrultusunda, IoT tabanlı sistemlerin tarımda sürdürülebilirlik, verimlilik ve kaynakların etkin yönetimi açısından büyük potansiyel taşıdığı görülmektedir.

3.10. Görüntü işleme

Tarım sektöründe dijital görüntü işleme tekniklerinin uygulanması, ürün kalitesi ve verimliliğinin artırılmasına yönelik önemli katkılar sağlamaktadır. Zararlı tespiti, bu uygulamaların en kritik alanlarından biridir. Doğal ortamda zararlılar her zaman var olmuş olsa da modern tarımda zararlılar istenmeyen unsurlar olarak kabul edilmektedir. Çünkü ürün gelişimini ve verimini olumsuz yönde etkileyebilirler (McCartney ve Lefsrud, 2018; Orka ve ark., 2023). Meyve veren çok sayıda bitki türünün bulunması, zararlı ve hastalık çeşitliliğinin de artmasına yol açmakta, bu durum zararlıların zamanında ve doğru biçimde tespit edilmesini zorlaştırmaktadır (Tian ve ark., 2020). Özellikle bu tespitler yalnızca çiftçinin deneyimine dayanıyorsa müdahalede gecikmeler yaşanabilmektedir. Zararlı türler arasında beyaz sinekler (*Aleyrodoidea*), yaprak bitleri (*Aphis* sp.), salyangozlar (*Mollusca*) ve çeşitli böcekler (*Insecta*) ön plana çıkmaktadır. Dijital görüntü işleme yöntemleri, bu zararlıların erken ve etkili tespiti için önemli avantajlar sunmakta, bu sayede müdahale süreçleri daha etkili ve çevreye zarar vermeyen biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Çeşitli çalışmalarda, dijital görüntü işleme tabanlı yaklaşımlar kullanılarak zararlıların yüksek doğrulukla tanımlanması amaçlanmıştır (McCartney ve Lefsrud, 2018; Orka ve ark., 2023).

Bitkilerin sağlıklı büyüme gelişmesi için toprağın, havanın ve suyun yanı sıra çeşitli besin elementlerine ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Ancak, bu besinlerin hem eksikliği hem de fazlalığı bitkilerde gelişim bozukluklarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, N-P-K dengelerindeki anormalliklerin erken aşamada tespiti, hem verim hem de kalite açısından büyük önem taşımaktadır. Dijital görüntü işleme teknikleri ve yapay zekâ algoritmaları, bu besin dengesizliklerinin tespitinde etkin, ekonomik ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Görüntü tabanlı analizler, bitkilerin yapraklarındaki renk değişimleri,

dokusal farklılıklar ve diğer morfolojik işaretler üzerinden besin eksikliklerinin tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

Tarım ürünlerinin pazara sunulmadan önce kalitelerinin değerlendirilmesi de ayrı bir önem taşımaktadır. Nihai tüketiciler, tüketecekleri ürünlerde renk, şekil, boyut ve ağırlık gibi fiziksel özelliklerin yüksek standartlarda olmasını beklemektedir. Geleneksel olarak bu kalite kontrol süreci, alanında uzman kişiler tarafından yürütülmekte; ancak, bu yöntemde insan faktörüne bağlı olarak hata payı bulunmaktadır. Örneğin, uzmanların sağlık durumu, psikolojik durumu ve yorgunluğu gibi etkenler değerlendirme sonucunu etkileyebilmekte ve hatalı sınıflandırmalara yol açabilmektedir (Arakeri ve Lakshmana, 2016; Bhargava ve Bansal, 2021). Bu dezavantajlar, dijital görüntü işleme tekniklerinin tarım ürünlerinin kalite kontrolünde kullanımını artırmıştır. Araştırmacılar, görüntü işleme ve makine öğrenmesi tabanlı otomatik sistemler geliştirerek ürünlerin kalite özelliklerini objektif, tutarlı ve hızlı şekilde değerlendirmeyi hedeflemiştir. Böylece, kalite denetimi süreçleri optimize edilmekte, ürünlerdeki kalite standartlarının korunması ve artırılması sağlanmaktadır. Bu kapsamda, dijital görüntü işleme teknikleri tarımda zararlı tespiti, besin eksikliğinin belirlenmesi ve kalite denetimi gibi kritik alanlarda önemli avantajlar sunmakta, verimliliğin artırılması ve sürdürülebilir üretim için etkin çözümler sağlamaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte bu tekniklerin doğruluk ve uygulanabilirlikleri giderek artmakta, tarımsal üretim süreçlerinde dijital dönüşümün temel taşlarından biri haline gelmektedir (Liu ve Chahl, 2018).

4. Sonuçlar

Geleneksel tarım yöntemlerinin sınırlılıkları, günümüzde tarımsal üretimde dijitalleşmenin ve ileri teknolojilerin entegrasyonunu zorunlu kılmıştır. Bu derleme, tarla bitkileri üretiminde kullanılan akıllı tarım teknolojilerinin çeşitli yönlerini kapsamlı biçimde değerlendirmiş ve bu teknolojilerin üretim süreçlerinde sağladığı somut faydaları ortaya koymuştur. Coğrafi bilgi sistemleri ve UA gibi mekânsal veri teknolojileri, tarımsal verimlilik ve kaynak yönetiminde yeni olanaklar sunarken, İHA'lar ve robotik sistemler gibi otomasyon temelli araçlar iş gücü verimliliğini artırmakta ve müdahale süreçlerini hızlandırmaktadır. Değişken oranlı uygulama ve verim izleme sistemleri, tarla içi değişkenliğin yönetilmesini kolaylaştırırken, yapay zekâ, makine öğrenmesi ve IoT uygulamaları ise karar destek sistemlerini güçlendirerek çiftçilerin doğru

zamanda doğru müdahalede bulunmalarını sağlamaktadır. Dijital görüntü işleme teknikleri ile ürün kalitesinin izlenmesi, zararlı ve hastalıkların erken teşhisi gibi kritik alanlarda başarı sağlanmakta, böylece tarımsal sürdürülebilirlik güçlendirilmektedir.

Akıllı tarım teknolojileri sadece verimlilik artışı sağlamamakta, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasına, kaynak kullanımının optimizasyonuna ve üretimde istikrarın sağlanmasına katkı sunmaktadır. Tarla bitkileri üretiminde geleceğe yönelik olarak ise, özellikle iklim değişikliği sürecinde su yönetiminin etkinleştirilmesi, akıllı sensörler ve CBS tabanlı sulama sistemleri ile kuraklık ve su stresi koşullarında su kullanımının en aza indirilmesi beklenmektedir. Bunun yanında, UA ve yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri aracılığıyla değişken iklim koşullarında en uygun ekim zamanlarının belirlenmesi ve verim kayıplarının azaltılması öngörülmektedir. Hasat öncesi ve sonrası süreçlerde dijital görüntüleme, İHA ve IoT uygulamaları sayesinde ürün olgunluğunun doğru zamanda belirlenmesi ile depolama ve lojistik faaliyetlerinin daha etkin yürütülmesi mümkün olacaktır. Ayrıca değişken oranlı uygulamalar sayesinde gübre ve pestisit kullanımının minimuma indirilmesi ve çevresel risklerin azaltılması söz konusudur.

Sonuç olarak “Tarım 5.0” vizyonu doğrultusunda, insan-teknoloji iş birliğini merkezine alan yeni nesil üretim modelleri, gelecekte tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini güvence altına alacak temel yapı taşlarından biri olacaktır.

Etik Beyanı

Yazar, bu araştırma için etik onay gerekmediğini beyan eder.

Finansman

Bu araştırma, hiçbir dış finansman almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Aasim, M., Akin, F., Ali, S.A., 2024. Synergizing LED technology and hydropriming for intelligent modeling and mathematical expressions to optimize chickpea germination and growth indices. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(7): 2340-2359.

- Aasim, M., Katirci, R., Baloch, F.S., Mustafa, Z., Bakhsh, A., Nadeem, M.A., Ali, S.A., Hatipoğlu, R., Çiftçi, V., Habyarimana, E., Karaköy, T., Chung, Y.S., 2022. Innovation in the breeding of common bean through a combined approach of in vitro regeneration and machine learning algorithms. *Frontiers in Genetics*, 13: 897696.
- Abdelfattah, M.A., Kumar, A.T., 2015. A web-based GIS enabled soil information system for the United Arab Emirates and its applicability in agricultural land use planning. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3): 1813-1827.
- Abiri, R., Rizan, N., Balasundram, S.K., Shahbazi, A.B., Abdul-Hamid, H., 2023. Application of digital technologies for ensuring agricultural productivity. *Heliyon*, 9(12): e22601.
- Al-Gaadi, K.A., Hassaballa, A.A., Tola, E., Kayad, A.G., Madugundu, R., Alblewi, B., Assiri, F., 2016. Prediction of potato crop yield using precision agriculture techniques. *PloS One*, 11(9): e0162219.
- Alonso, R.S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., Rodríguez-González, S., 2020. An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, 98: 102047.
- Amarasingam, N., Salgadoe, A.S.A., Powell, K., Gonzalez, L.F., Natarajan, S., 2022. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26: 100712.
- Antony, A.P., Leith, K., Jolley, C., Lu, J., Sweeney, D.J., 2020. A review of practice and implementation of the internet of things (IoT) for smallholder agriculture. *Sustainability*, 12(9): 3750.
- Arakeri, M.P., Lakshmana, 2016. Computer vision based fruit grading system for quality evaluation of tomato in agriculture industry. *Procedia Computer Science*, 79: 426-433.
- Avanidou, K., Alexandridis, T., Kavroudakis, D., Kizos, T., 2023. Development of a multi scale interactive web-GIS system to monitor farming practices: a case study in Lemnos Island, Greece. *Smart Agricultural Technology*, 5: 100313.
- Awais, M., Li, W., Cheema, M.J.M., Zaman, Q.U., Shaheen, A., Aslam, B., Zhu, W., Ajmal, M., Faheem, M., Hussain, S., Nadeem, A.A., Afzal, M.M., Liu, C., 2022. UAV-based remote sensing in plant stress images using high-resolution thermal sensor for digital agriculture practices: A meta-review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1): 1135-1152.
- Ayanga, M., Akaba, S., Nyaaba, A.A., 2021. Multifaceted applicability of drones: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 167: 120677.
- Aziz, M.A., Hossain, A.Z., Moniruzzaman, M., Ahmed, R., Zahan, T., Azim, S., Qayum, A., Al Mamun, A., Kader, A., Rahman, N.F., 2022. Mapping of agricultural drought in Bangladesh using geographic information system (GIS). *Earth Systems and Environment*, 6(3): 657-667.
- Barnes, E.M., Baker, M.G., 2000. Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(6): 731-741.
- Bayrakdar, M.E., 2019. A smart insect pest detection technique with qualified underground wireless sensor nodes for precision agriculture. *IEEE Sensors Journal*, 19(22): 10892-10897.
- Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., De Abelleyra, D., Ferraz, R.P.D., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simões, M., Verón, S.R., 2018. Remote sensing and cropping practices: A review. *Remote Sensing*, 10(1): 99.
- Berni, J.A., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., Fereres, E., 2009. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3): 722-738.
- Bhargava, A., Bansal, A., 2021. Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: A review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(3): 243-257.
- Boda, P.A., Fusi, F., Miranda, F., Palmer, G.J., Flax-Hatch, J., Siciliano, M., Cailas, M., 2023. Environmental justice through community-policy participatory partnerships. *Journal of Environmental Protection*, 14(8): 616-636.
- Bouguettaya, A., Zarzour, H., Kechida, A., Taberkit, A.M., 2022. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: A review. *Neural Computing and Applications*, 34(12): 9511-9536.
- Boursianis, A.D., Papadopoulou, M.S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., Goudos, S.K., 2022. Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*, 18: 100187.
- Brevik, E.C., Calzolari, C., Miller, B.A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., Jordán, A., 2016. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, 264(Part B): 256-274.
- Campos, J., Gallart, M., Llop, J., Ortega, P., Salcedo, R., Gil, E., 2020. On-farm evaluation of prescription map-based variable rate application of pesticides in vineyards. *Agronomy*, 10(1): 102.
- Cañadas, J., Sanchez-Molina, J.A., Rodríguez, F., del Águila, I.M., 2017. Improving automatic climate control with decision support techniques to minimize disease effects in greenhouse tomatoes. *Information Processing in Agriculture*, 4(1): 50-63.
- Casady, W.W., Palm H.L., 2002. Precision Agriculture: Remote Sensing and Ground Truthing. Environmental Quality MU Guide, MU Extension, University of Missouri-Columbia, (<https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/9431/PrecisionAgriculture.pdf?sequence=3&isAllowed=y>).
- Chowdhury, B.S., Raghukiran, N., 2017. Autonomous sprinkler system with internet of things.

- International Journal of Applied Engineering Research*, 12(16): 5430-5432.
- DaMatta, F.M., Grandis, A., Arenque, B.C., Buckeridge, M.S., 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43(7): 1814-1823.
- Dandrifosse, S., Jago, A., Huart, J.P., Michaud, V., Planchon, V., Rosillon, D., 2024. Automatic quality control of weather data for timely decisions in agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 8: 100445.
- Das, S., Chapman, S., Christopher, J., Choudhury, M.R., Menzies, N.W., Apan, A., Dang, Y.P., 2021. UAV-thermal imaging: A technological breakthrough for monitoring and quantifying crop abiotic stress to help sustain productivity on sodic soils—A case review on wheat. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23: 100583.
- Davatgar, N., Neishabouri, M.R., Sepaskhah, A.R., 2012. Delineation of site-specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. *Geoderma*, 173: 111-118.
- Dengiz, O., Özyazıcı, M.A., 2018. Çeltik tarımına uygun alanların belirlenmesinde çok kriterli arazi değerlendirme. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 6(1): 19-28.
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., Kaliaperumal, R. 2022. Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. *Agriculture*, 12(10): 1745.
- Diène, B., Rodrigues, J.J., Diallo, O., Ndoeye, E.H.M., Korotaev, V.V., 2020. Data management techniques for internet of things. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138: 106564.
- Dlamini, W.M., 2009. Characterization of the July 2007 Swaziland fire disaster using satellite remote sensing and GIS. *Applied Geography*, 29(3): 299-307.
- Dursun, M., Ozden, S., 2011. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Scientific Research and Essays*, 6(7): 1573-1582.
- El-Seedy, M.E., 2019. Evaluation of spatial variability of some soil properties and fertility status using nutrient index and GIS in Bilqas District, Dakahlia Governorate, Egypt. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 10(12): 793-803.
- Faiçal, B.S., Costa, F.G., Pessin, G., Ueyama, J., Freitas, H., Colombo, A., Fini, P. H., Villas, L., Osório, F.S., Vargas, P. A. Braun, T., 2014. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides. *Journal of Systems Architecture*, 60(4): 393-404.
- Faiçal, B.S., Freitas, H., Gomes, P.H., Mano, L.Y., Pessin, G., de Carvalho, A.C., Krishnamachari, B., Ueyama, J., 2017. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138: 210-223.
- Farooq, M.S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., Naeem, M.A., 2019. A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. *IEEE Access*, 7: 156237-156271.
- Fleming, S.W., Goodbody, A.G., 2019. A machine learning metasystem for robust probabilistic nonlinear regression-based forecasting of seasonal water availability in the US west. *IEEE Access*, 7: 119943-119964.
- Folhes, M.T., Rennó, C.D., Soares, J.V., 2009. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, 96(10): 1398-1408.
- Friha, O., Ferrag, M.A., Shu, L., Maglaras, L.A., Wang, X., 2021. Internet of things for the future of smart agriculture: a comprehensive survey of emerging technologies. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(4): 718- 752.
- Gao, D., Sun, Q., Hu, B., Zhang, S., 2020. A framework for agricultural pest and disease monitoring based on internet-of-things and unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 20(5): 1487.
- Glaroudis, D., Iossifides, A., Chatzimisios, P., 2020. Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming. *Computer Networks*, 168: 107037.
- Goap, A., Sharma, D., Shukla, A.K., Krishna, C.R., 2018. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open-source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155: 41-49.
- Griepentrog, H.W., Nørremark, M., Nielsen, H., Blackmore, B.S., 2005. Seed mapping of sugar beet. *Precision Agriculture*, 6: 157-165.
- Hadipour, M., Derakhshandeh, J.F., Shiran, M.A., 2020. An experimental setup of multi-intelligent control system (MICS) of water management using the Internet of Things (IoT). *ISA Transactions*, 96: 309-326.
- Hassan, S.S., Goheer, M.A., 2021. Modeling and monitoring wheat crop yield using geospatial techniques: A case study of potohar region, Pakistan. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(6): 1331-1342.
- Hoque, M.A.A., Pradhan, B., Ahmed, N., Sohel, M.S.I., 2021. Agricultural drought risk assessment of Northern New South Wales, Australia using geospatial techniques. *Science of the Total Environment*, 756: 143600.
- Huang, Y., Hoffman, W.C., Lan, Y., Fritz, B.K., Thomson, S.J., 2015. Development of a low-volume sprayer for an unmanned helicopter. *Journal of Agricultural Science*, 7(1): 148-153.
- Hunt Jr, E.R., Hively, W.D., Fujikawa, S.J., Linden, D.S., Daughtry, C.S., McCarty, G.W., 2010. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1): 290-305.
- Iftikhar, S., Gill, S.S., Song, C., Xu, M., Aslanpour, M.S., Toosi, A.N., Uhlig, S., 2023. AI-based fog and edge computing: A systematic review,

- taxonomy and future directions. *Internet of Things*, 21: 100674.
- Ildırar, M., Dalli, T., 2021. Dünyada ve Türkiye’de Tarım 4.0 uygulamaları. *IV. Uluslararası Kahramanmaraş Yönetim, Ekonomi ve Siyaset Kongresi*, Bildiriler Kitabı, 23-24 Eylül, Mardin, s. 145-153.
- JayaBrindha, G., Subbu, E.G., 2017. Ant colony technique for optimizing the order of cascaded SVM classifier for sunflower seed classification. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2(1): 78-88.
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., Shah, M., 2019. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2: 1-12.
- Kakarla, S.C., Costa, L., Ampatzidis, Y., Zhang, Z., 2022. Applications of UAVs and machine learning in agriculture. In: Z. Zhang, H. Liu, C. Yang, Y. Ampatzidis, J. Zhou and Y. Jiang (Eds.), *Unmanned Aerial Systems in Precision Agriculture*, Smart Agriculture, Springer, Singapore, pp. 1-19.
- Katekar, V., Cheruku, J.K., 2022. The application of drone technology for sustainable agriculture in India. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3): 352-365.
- Khanal, S., Fulton, J., Klopfenstein, A., Douridas, N., Shearer, S., 2018. Integration of high resolution remotely sensed data and machine learning techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153: 213-225.
- Khatri, N., Sharma, A., Khatri, K.K., Sharma, G.D., 2018. An IoT based innovative real-time pH monitoring and control of municipal wastewater for agriculture and gardening. In: A.K. Somani, S. Srivastava, A. Mundra, S. Rawat (Eds.), *Proceedings of First International Conference on Smart System, Innovations and Computing*, Springer, India, pp. 353-362.
- Khattab, A., Habib, S.E., Ismail, H., Zayan, S., Fahmy, Y., Khairy, M.M., 2019. An IoT-based cognitive monitoring system for early plant disease forecast. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166: 105028.
- Khose, S.B., Mailapalli, D.R., 2024. Spatial mapping of soil moisture content using very-high resolution UAV-based multispectral image analytics. *Smart Agricultural Technology*, 8: 100467.
- Köksal, Ö., Tekinerdogan, B., 2019. Architecture design approach for IoT-based farm management information systems. *Precision Agriculture*, 20: 926-958.
- Krishna, K.L., Silver, O., Malende, W.F., Anuradha, K., 2017. Internet of Things application for implementation of smart agriculture system. *International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*, 10-11 February, India, pp. 54-59.
- Kumar, S.K., Babu, S.D.B., 2016. A web GIS based decision support system for agriculture crop monitoring system-A case study from part of Medak District. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 5(4): 177-197.
- Kurtz, D.B., Schellberg, J., Braun, M., 2010. Ground and satellite-based assessment of rangeland management in sub-tropical Argentina. *Applied Geography*, 30(2): 210-220.
- Lan, Y., Thomson, S.J., Huang, Y., Hoffmann, W.C., Zhang, H., 2010. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1): 34-38.
- Lark, R.M., Stafford, J.V., 1997. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Annals of Applied Biology*, 130(1): 111-121.
- Lavanya, G., Rani, C., GaneshKumar, P., 2020. An automated low cost IoT based Fertilizer Intimation System for smart agriculture. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28: 100300.
- Lelong, C.C., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S., Baret, F., 2008. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors*, 8(5): 3557-3585.
- Li, W., Liu, C., Yang, Y., Awais, M., Li, W., Ying, P., Ru, W., Cheema, M.J.M., 2022. A UAV-aided prediction system of soil moisture content relying on thermal infrared remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(10): 9587-9600.
- Liao, M.S., Chuang, C.L., Lin, T.S., Chen, C.P., Zheng, X.Y., Chen, P.T., Jiang, J.A., 2012. Development of an autonomous early warning system for *Bactrocera dorsalis* (Hendel) outbreaks in remote fruit orchards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 88: 1-12.
- Lin, Z., Mu, S., Huang, F., Mateen, K.A., Wang, M., Gao, W., Jia, J., 2019. A unified matrix-based convolutional neural network for fine-grained image classification of wheat leaf diseases. *IEEE Access*, 7: 11570-11590.
- Liu, H., Chahl, J.S., 2018. A multispectral machine vision system for invertebrate detection on green leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150: 279-288.
- Longchamps, L., Khosla, R., 2015. Improving N use efficiency by integrating soil and crop properties for variable rate N management. In: J.V. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture*, 1st Edition, Wageningen Academic Publishers, Washington, pp. 249-256.
- Masrie, M., Rosman, M.S.A., Sam, R., Janin, Z., 2017. Detection of nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK) nutrients of soil using optical transducer. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application*, 28-30 November, Malaysia, pp. 1-4.
- McCartney, L., Lefsrud, M., 2018. Protected agriculture in extreme environments: a review of controlled environment agriculture in tropical, arid, polar, and urban locations. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(2): 455-473.

- McFadden, J., Njuki, E., Griffin, T., 2023. Precision Agriculture in the Digital Era: Recent Adoption on U.S. Farms. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Economic Information Bulletin No: 248.
- Memon, M.S., Jun, Z., Sun, C., Jiang, C., Xu, W., Hu, Q., Ji, C., 2019. Assessment of wheat straw cover and yield performance in a rice-wheat cropping system by using Landsat satellite data. *Sustainability*, 11(19): 5369.
- Méndez-Barroso, L.A., Garatuza-Payán, J., Vivoni, E.R., 2008. Quantifying water stress on wheat using remote sensing in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Agricultural Water Management*, 95(6): 725-736.
- Metwally, M.S., Shaddad, S.M., Liu, M., Yao, R.J., Abdo, A.I., Li, P., Chen, X., 2019. Soil properties spatial variability and delineation of site-specific management zones based on soil fertility using fuzzy clustering in a hilly field in Jianyang, Sichuan, China. *Sustainability*, 11(24): 7084.
- Mohanraj, I., Ashokumar, K., Naren, J.J.P.C.S., 2016. Field monitoring and automation using IOT in agriculture domain. *Procedia Computer Science*, 93: 931-939.
- Muhammad, A., Haider, B., Ahmad, Z., 2016. IoT enabled analysis of irrigation rosters in the Indus basin irrigation system. *Procedia Engineering*, 154: 229-235.
- Mukherjee, A., Misra, S., Sukrutha, A., Raghuvanshi, N.S., 2020. Distributed aerial processing for IoT-based edge UAV swarms in smart farming. *Computer Networks*, 167: 107038.
- Mulla, D.J., 2013. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4): 358-371.
- Narayana, T.L., Venkatesh, C., Kiran, A., Kumar, A., Khan, S.B., Almusharraf, A., Quasim, M.T., 2024. Advances in real time smart monitoring of environmental parameters using IoT and sensors. *Heliyon*, 10(7): e28195.
- Nevavuori, P., Narra, N., Linna, P., Lipping, T. 2020. Crop yield prediction using multitemporal UAV data and spatio-temporal deep learning models. *Remote Sensing*, 12(23): 4000.
- Nex, F., Armenakis, C., Cramer, M., Cucci, D.A., Gerke, M., Honkavaara, E., Kukko, A., Persello, C., Skaloud, J., 2022. UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184: 215-242.
- Ojara, M.A., Yunsheng, L., Babausmail, H., Sempa, A.K., Ayugi, B., Ogwang, B.A., 2022. Evaluation of drought, wet events, and climate variability impacts on maize crop yields in East Africa during 1981–2017. *International Journal of Plant Production*, 16(1): 41-62.
- Orka, N.A., Tushique, F.M., Uddin, M.N., Bari, M.L., 2023. Application of computer vision in assessing crop abiotic stress: A systematic review. *Plos One*, 18(8): e0290383.
- Özgüven, M.M., 2023. Bahçe bitkileri yetiştiriciliğinde kullanılan dijital tarım teknolojileri, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 19(3): 174-193.
- Özyazıcı, M.A., Dengiz, O., Aydoğan, M., Bayraklı, B., Kesim, E., Urla, Ö., Yıldız, H., Ünal, E., 2015. Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi tarım topraklarının bazı makro ve mikro bitki besin maddesi konsantrasyonları ve ters mesafe ağırlık yöntemi (IDW) ile haritalanması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 16(2): 187-202.
- Özyazıcı, M.A., Dengiz, O., Aydoğan, M., Bayraklı, B., Kesim, E., Urla, Ö., Yıldız, H., Ünal, E., 2016. Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi tarım topraklarının temel verimlilik düzeyleri ve alansal dağılımları. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 31(1): 136-148.
- Özyazıcı, M.A., Dengiz, O., İmamoğlu, A., 2014. Siirt ili bazı arazi ve toprak özelliklerinin coğrafi bilgi sistem analizleriyle değerlendirilmesi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 1(2): 128-137.
- Paraforos, D.S., Vassiliadis, V., Kortenbruck, D., Stamkopoulos, K., Ziogas, V., Sapounas, A. A., Griepentrog, H.W., 2016. A farm management information system using future internet technologies. *IFAC-Papers Online*, 49(16): 324-329.
- Pedersen, S.M., Fountas, S., Blackmore, S., 2008. Agricultural robots-Applications and economic perspectives. In: Y. Takahashi (Ed.), *Service Robot Applications*, IntechOpen, Japan, pp. 369-382.
- Quy, N.M., Ngoc, L.A., Ban, N.T., Hau, N.V., Quy, V.K., 2023. Edge computing for real-time Internet of Things applications: Future internet revolution. *Wireless Personal Communications*, 132(2): 1423-1452.
- Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., Moscholios, I., 2020. A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172: 107148.
- Raihan, A., 2023. A comprehensive review of artificial intelligence and machine learning applications in energy sector. *Journal of Technology Innovations and Energy*, 2(4): 1-26.
- Raihan, A., Bijoy, T.R., 2023. A review of the industrial use and global sustainability of *Cannabis sativa*. *Global Sustainability Research*, 2(4): 1-29.
- Raihan, A., Tuspekova, A., 2022. The nexus between economic growth, energy use, urbanization, tourism, and carbon dioxide emissions: New insights from Singapore. *Sustainability Analytics and Modeling*, 2: 100009.
- Richard, K., Abdel-Rahman, E.M., Subramanian, S., Nyasani, J.O., Thiel, M., Jozani, H., Borgemeister, C., Landmann, T., 2017. Maize cropping systems mapping using rapideye observations in agro-ecological landscapes in Kenya. *Sensors*, 17(11): 2537.
- Riedell, W.E., Osborne, S.L., Hesler, L.S., 2004. Insect pest and diseasedetection using remote sensing techniques. *Proceedings of 7th International*

- Conference on Precision Agriculture*, 25-28 July, USA, pp. 1380-1387.
- Roy, S., Hore, J., Sen, P., Salma, U., 2023. Hyperspectral remote sensing and its application in pest and disease management in agriculture. *Indian Farmer*, 10(5): 229-232.
- Sahni, R.K., Kumar, S.P., Thorat, D., Rajwade, Y., Jyoti, B., Ranjan, J., Anand, R., 2024. Drone spraying system for efficient agrochemical application in precision agriculture. In: S.S. Chouhan, U.P. Singh and S. Jain (Eds.), *Applications of Computer Vision and Drone Technology in Agriculture 4.0*, Springer, Singapore, pp. 225-244.
- Samson, G., Tremblay, N., Dudelzak, A.E., Babichenko, S.M., Dextraze, L., Wollring, J., 2000. Nutrient stress of corn plants: Early detection and discrimination using a compact multiwavelength fluorescent lidar. *Proceedings of the 20th EARSeL Symposium*, June 16-17, Dresden, Germany, pp. 214-223.
- Shaheb, M.R., Venkatesh, R., Shearer, S.A., 2021. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46: 417-439.
- Shearer, S.A., Fulton, J.P., McNeill, S.G., Higgins, S.F., Engineering, A., 2002. Elements of Precision Agriculture: Basics of Yield Monitor Installation and Operation. College of Agriculture, University of Kentucky, Extension Publications, Publication ID: PA-1, (<https://publications.mgcafe.uky.edu/sites/publications.ca.uky.edu/files/pa1.pdf>).
- Shokr, M.S., Abdellatif, M.A., El Baroudy, A.A., Elnashar, A., Ali, E.F., Belal, A.A., Attia, W., Ahmed, M., Aldosari, A.A., Szantoi, Z., Jalhoum, M.E., Kheir, A.M., 2021. Development of a spatial model for soil quality assessment under arid and semi-arid conditions. *Sustainability*, 13(5): 2893.
- Singh, U.P., Chouhan, S.S., Jain, S., Jain, S., 2019. Multilayer convolution neural network for the classification of mango leaves infected by anthracnose disease. *IEEE Access*, 7: 43721-43729.
- Singha, C., Swain, K.C., Swain, S.K., 2020. Best crop rotation selection with GIS-AHP technique using soil nutrient variability. *Agriculture*, 10(6): 213.
- Sood, K., Singh, S., Rana, R.S., Rana, A., Kalia, V., Kaushal, A., 2015. Application of GIS in precision agriculture. *Proceedings of the National Seminar on Precision Farming Technologies for High Himalayas*, October 4-5, India, pp. 4-5.
- Song, Y., Bi, J., Wang, X., 2024. Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, 25: 101029.
- Souza, E.G., Bazzi, C.L., Khosla, R., Uribe-Opazo, M.A., Reich, R.M., 2016. Interpolation type and data computation of crop yield maps is important for precision crop production. *Journal of Plant Nutrition*, 39(4): 531-538.
- Stroppiana, D., Boschetti, M., Brivio, P.A., Bocchi, S., 2009. Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry. *Field Crops Research*, 111(1-2): 119-129.
- Su, J., Zhu, X., Li, S., Chen, W.H., 2023. AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture. *Neurocomputing*, 518: 242-270.
- Symeonaki, E., Arvanitis, K., Piromalis, D., 2020. A context-aware middleware cloud approach for integrating precision farming facilities into the IoT toward agriculture 4.0. *Applied Sciences*, 10(3): 813.
- Talavera, J.M., Tobón, L.E., Gómez, J.A., Culman, M.A., Aranda, J.M., Parra, D.T., Garreta, L.E., 2017. Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142: 283-297.
- Talaviya, T., Shah, D., Patel, N., Yagnik, H., Shah, M., 2020. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4: 58-73.
- Thomas, S., Kuska, M.T., Bohnenkamp, D., Brugger, A., Alisaac, E., Wahabzada, M., Behmann J., Mahlein, A.K., 2018. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: A technical perspective. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 125: 5-20.
- Tian, H., Wang, T., Liu, Y., Qiao, X., Li, Y., 2020. Computer vision technology in agricultural automation-A review. *Information Processing in Agriculture*, 7(1): 1-19.
- Tilling, A.K., O'Leary, G.J., Ferwerda, J.G., Jones, S.D., Fitzgerald, G.J., Rodriguez, D., Belford, R., 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Research*, 104(1-3): 77-85.
- Tomic, T., Schmid, K., Lutz, P., Domel, A., Kassecker, M., Mair, E., Burschka, D., 2012. Toward a fully autonomous UAV: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3): 46-56.
- Toscano, P., Castrignanò, A., Di Gennaro, S.F., Vonella, A.V., Ventrella, D., Matese, A., 2019. A precision agriculture approach for durum wheat yield assessment using remote sensing data and yield mapping. *Agronomy*, 9(8): 437.
- Tothill, I.E., 2001. Biosensors developments and potential applications in the agricultural diagnosis sector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3): 205-218.
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Kittas, C., 2017. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164: 31-48.
- Velusamy, P., Rajendran, S., Mahendran, R.K., Naseer, S., Shafiq, M., Choi, J.G., 2021. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in precision agriculture: *Applications and Challenges, Energies*, 15(1): 217.
- Voumik, L.C., Mimi, M.B., Raihan, A., 2023. Nexus between urbanization, industrialization, natural resources rent, and anthropogenic carbon emissions

- in South Asia: CS-ARDL approach. *Anthropocene Science*, 2(1): 48-61.
- Warpe, S.T., Pippal, R.S., 2016. A study of fertilizer distribution system for agriculture using wireless sensor network. *International Journal of Computer Applications*, 147(2): 43-46.
- Wei, Z., Fang, W., 2024. UV-NDVI for real-time crop health monitoring in vertical farms. *Smart Agricultural Technology*, 8: 100462.
- Wong, T.F.M., Stone, P.J., Lyle, G., Wittwer, K., 2004. PA for all-Is it the journey, destination or mode of transport that's most important? *Proceedings of 7th International Conference on Precision Agriculture*, 25-28 July, USA, pp. 576-585.
- Wu, B., Zhang, M., Zeng, H., Tian, F., Potgieter, A.B., Qin, X., Yan, N., Chang, S., Zhao, Y., Dong, Q., Boken, V., Plotnikov, D., Guo, H., Wu, F., Zhao, H., Deronde, B., Tits, L., Loupian, E., 2023. Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: A review. *National Science Review*, 10(4): nwac290.
- Xie, C., Shao, Y., Li, X., He, Y., 2015. Detection of early blight and late blight diseases on tomato leaves using hyperspectral imaging. *Scientific Reports*, 5(1): 16564.
- Yaman, H., Sungur, O., Dulupçu, M.A., 2021. Dünyada tarım ve hayvancılığın dönüşümü: teknolojiye dayalı uygulamalar ve devrimler. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 27(2): 123-133.
- Yang, C.C., Prasher, S.O., Enright, P., Madramootoo, C., Burgess, M., Goel, P.K., Callum, I., 2003. Application of decision tree technology for image classification using remote sensing data. *Agricultural Systems*, 76(3): 1101-1117.
- Yıldız, B.İ., Karabağ, K., 2025. Deep learning approaches for image-based classification of honey bee (*Apis mellifera*) lineages. *Turkish Journal of Agricultural Research*, 12(2): 224-230.
- Yuan, Y., Miao, Y., Yuan, F., Ata-UI-Karim, S.T., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., Cao, Q., 2022. Delineating soil nutrient management zones based on optimal sampling interval in medium-and small-scale intensive farming systems. *Precision Agriculture*, 23(2): 538-558.
- Yusupova, F.E., 2024. Effectiveness of using GIS technologies in agriculture. *Czech Journal of Multidisciplinary Innovations*, 25: 5-10.
- Zhang, C., Kovacs, J.M., 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13: 693-712.
- Zhang, R., Hao, F., Sun, X., 2017. The design of agricultural machinery service management system based on Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 107: 53-57.
- Zhang, S., Wang, Y., Zhu, Z., Li, Z., Du, Y., Mao, E., 2018. Tractor path tracking control based on binocular vision. *Information Processing in Agriculture*, 5(4): 422-432.
- Zhang, X., Sun, Y., Shang, K., Zhang, L., Wang, S., 2016. Crop classification based on feature band set construction and object-oriented approach using hyperspectral images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(9): 4117-4128.
- Zhao, G., Zhang, Y., Lan, Y., Deng, J., Zhang, Q., Zhang, Z., Li, Z., Liu, L., Huang, X., Ma, J., 2023. Application progress of UAV-LARS in identification of crop diseases and pests. *Agronomy*, 13(9): 2232.
- Zhao, Y., Liu, L., Xie, C., Wang, R., Wang, F., Bu, Y., Zhang, S., 2020. An effective automatic system deployed in agricultural Internet of Things using Multi-Context Fusion Network towards crop disease recognition in the wild. *Applied Soft Computing*, 89: 106128.
- Zhou, G., Zhang, W., Chen, A., He, M., Ma, X., 2019. Rapid detection of rice disease based on FCM-KM and faster R-CNN fusion. *IEEE Access*, 7: 143190-143206.

ALINTI: Severoğlu, S., 2025. Tarla Bitkilerinde Kullanılan Akıllı Tarım Teknolojileri. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 12(3): 348-364.

CITATION: Severoğlu, S., 2025. Smart Agricultural Technologies Used in the Field Crops. *Turkish Journal of Agricultural Research*, 12(3): 348-364. (In Turkish).