

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM İÇİN YENİLİKÇİ MEKANİZASYON YAKLAŞIMLARI

Editör:

Doç. Dr. Ömer ERTUĞRUL



Aralık 2025



IKSAD
Publishing House

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM İÇİN YENİLİKÇİ MEKANİZASYON YAKLAŞIMLARI

EDİTÖR

Doç. Dr. Ömer ERTUĞRUL

YAZARLAR

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI

Doç. Dr. Bahadır DEMİREL

Doç. Dr. Ömer ERTUĞRUL

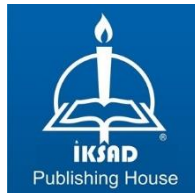
Dr. Öğr. Üyesi Gülden ÖZGÜNALTAY ERTUĞRUL

Arş. Gör. Dr. Mustafa ÇOMAKLI

Arş. Gör. Mustafa Arif TİMOÇİN

Arş. Gör. Osman Mert YAZ

Arş. Gör. Özlem BAHAR



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed
or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial
uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and
Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-489-8
Cover Design: Ömer ERTUĞRUL
December / 2025
Ankara / Türkiye
Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

PÜLVERİZASYONDA AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN PATERNATÖRLER VE UYGULAMA ZORLUKLARI

Arş. Gör. Dr. Mustafa ÇOMAKLI

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI.....3

BÖLÜM 2

COĞRAFİ YAPAY ZEKÂ (GEOAI): KAVRAMSAL ÇERÇEVE, UYGULAMA ALANLARI VE TARIM SEKTÖRÜNDEKİ POTANSİYELİ

Dr. Öğr. Üyesi Gülden ÖZGÜNALTAY ERTUĞRUL.....25

BÖLÜM 3

TARIMDA ROBOTİK DÖNÜŞÜM: SERA UYGULAMALARI İÇİN AKILLI HASAT SİSTEMLERİ

Arş. Gör. Osman Mert YAZ

Doç. Dr. Bahadır DEMİREL

Arş. Gör. Özlem BAHAR.....57

BÖLÜM 4

AKILLI TARIMDA YABANCI OTLARIN ALGILANMASI VE KONTROLÜ: YAPAY ZEKÂNIN ROLÜ

Arş. Gör. Özlem BAHAR.....81

BÖLÜM 5

SERALARDA KULLANILAN OTOMASYON SİSTEMLERİ

Arş. Gör. Mustafa Arif TİMOÇİN

Arş. Gör. Osman Mert YAZ.....103

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM İÇİN KALİTE YÖNETİM SİSTEMİNE DAYALI MEKANİZASYON PLANLAMASI

Doç. Dr. Ömer ERTUĞRUL.....131

ÖNSÖZ

Dünya genelinde artan nüfus, iklim değişikliğinin derinleşen etkileri, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve tarımsal üretim üzerindeki ekonomik baskılar; tarım sektörünü yalnızca daha fazla üretmeye değil, aynı zamanda daha akıllı, daha verimli ve daha sürdürülebilir üretim sistemleri geliştirmeye zorlamaktadır. Bu bağlamda tarımsal mekanizasyon, artık yalnızca iş gücünü azaltan bir araç olmanın ötesine geçmiş; veri, otomasyon, yapay zekâ ve yönetim sistemleriyle bütünleşen stratejik bir dönüşüm alanı haline gelmiştir.

Sürdürülebilir Tarım için Yenilikçi Mekanizasyon Yaklaşımları başlıklı bu kitap, söz konusu dönüşümü çok boyutlu bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır. Eserde yer alan bölümler; tarımsal üretimde çevresel etkilerin azaltılması, kaynak kullanım etkinliğinin artırılması ve karar alma süreçlerinin bilimsel temellere dayandırılması hedefleri doğrultusunda, mekanizasyonun güncel ve geleceğe dönük uygulamalarını kapsamlı biçimde irdelemektedir.

Kitapta, bitki koruma uygulamalarında püskürtme teknolojilerinin performans değerlendirilmesinden, Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI) temelli mekânsal analizlere; sera tarımında robotik hasat sistemlerinden, yapay zekâ destekli yabancı ot algılama ve kontrol yaklaşımlarına; sera otomasyon sistemlerinden, kalite yönetim sistemlerine dayalı bütüncül mekanizasyon planlamasına kadar geniş bir konu yelpazesi sunulmaktadır.

Bu kitabın temel amacı; tarımsal mekanizasyonu parçalı çözümlerden uzaklaştırarak, ölçülebilir, izlenebilir ve sürekli iyileştirilebilir sistemler bütününe dönüştürmeye katkı sağlamaktır. Akademisyenler, lisansüstü ve lisans öğrencileri, uygulayıcı mühendisler, politika yapımcılar ve tarım sektörünün tüm paydaşları için güncel, disiplinler arası ve yol gösterici bir kaynak oluşturması hedeflenmiştir.

Eserin hazırlanmasında katkı sunan tüm yazarlar, kendi uzmanlık alanlarında bilimsel birikimlerini titizlikle ortaya koymuş; teori ile uygulamayı buluşturan nitelikli bölümlerle bu kitabın ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu vesileyle, emeği geçen tüm yazarlara ve sürece katkı sağlayan herkese teşekkür eder; kitabın sürdürülebilir tarım hedeflerine yönelik çalışmalarına ilham vermesini temenni ederiz.

BÖLÜM 1

PÜLVERİZASYONDA AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN PATERNATÖRLER VE UYGULAMA ZORLUKLARI

Arş. Gör. Dr. Mustafa ÇOMAKLI¹

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18074089>

¹Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 25240 Erzurum, Türkiye. mustafa.comakli@atauni.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-3974-1354

²Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 11200 Bilecik, Türkiye. bahadir.sayinci@bilecik.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-7148-0855

1. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) 2023 yılı istatistiklerine göre, dünya genelinde yıllık pestisit kullanımı 3.728 milyon ton düzeyindeyken Türkiye’de bu miktar 57576 ton olarak on birinci sırada yer almaktadır. Pestisit kullanım yoğunluğu bakımından değerlendirildiğinde Türkiye 2023 yılında dünya ortalaması 2.40 kg ha⁻¹ ile aynı değerde olup Avrupa birliğinden (1.55 kg ha⁻¹) yüksek seviyededir (FAO, 2023). Tarımsal üretimin gerçekleştirildiği alanlar dikkate alındığında, Türkiye’de pestisit kullanımının oldukça yoğun olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bitki koruma makinelerinin test ve kalibrasyon olanakları sınırlı düzeyde olup bu durum uygulama etkinliği başarısını olumsuz yönde etkilemektedir.

Kimyasal mücadelede, etkili maddenin zararlı veya hastalığın aktif olduğu tüm bölgeye yeknesak biçimde pülverize edilmesi, püskürtülen yüzeyi etkin şekilde kaplaması ve tutunması ile pestisit dağılımındaki varyasyonun ve sürüklenme düzeyinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Böylece optimum ilaç dozuyla en yüksek biyolojik etkinliğin sağlanması amaçlanır. Kimyasal mücadelenin amacına uygun bir biçimde gerçekleştirilebilmesi, ilaçlama ekipmanlarının doğru seçilmesinin yanı sıra püskürtme memelerinin kalibrasyonu, memeler arası mesafenin doğru ayarlanması ve püskürtme yüksekliği gibi temel işletme parametrelerinin uygun şekilde belirlenip uygulanmasına bağlıdır (Çomaklı, 2024).

Püskürtme dağılım düzensizliği, ürün üzerinde oluşabilecek zarar riskini en aza indirirken kapsama alanını maksimize etmekte ve pestisit uygulama etkinliğinin artırılmasında kritik bir öneme sahiptir (Butts et al., 2019). Bitki koruma makineleri aracılığıyla pestisitlerin etkin biçimde uygulanması zararlılarla mücadelede başarı düzeyinin artırılması, pestisit kullanım miktarının ve buna bağlı maliyetlerin azaltılması ile çevresel güvenliğin sağlanması açısından modern tarım uygulamalarında önemini sürdürmektedir (Elwakeel et al., 2021). Pestisit uygulamalarında, hava akımlarının etkisiyle bitki koruma ürünlerinin yalnızca sınırlı bir kısmı hedef yüzeye ulaşmakta; geri kalan damlacıklar ise sürüklenme (drift) nedeniyle havada asılı kalmakta, hedef dışı alanlara taşınmakta ve sonuç olarak önemli düzeyde pestisit kaybı ve israfı meydana gelmektedir (Grella et al., 2023). Püskürtme sürüklenmesi sonucu damlacıkların hedef dışına taşınması; çevresel kirliliğe yol açmakta, herbisit kullanımında etkinliği azaltmakta ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler

oluşturabilmektedir (Hewitt, 2000). Yabancı ot popülasyonlarının öldürücü etkinliğin altında kalan dozlara maruz kalması, bu türler üzerinde bir seçim baskısı oluşturarak herbisitlere dirençli yabancı otların evrimsel sürecini hızlandırabilmektedir (Manalil et al., 2011; Ferguson et al., 2018).

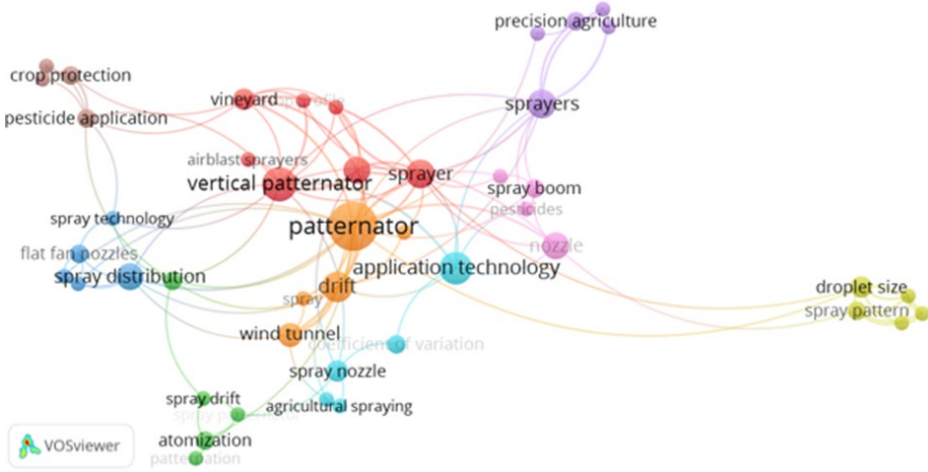
Bitki koruma makineleri ile gerçekleştirilen pestisit uygulamalarının başarısını değerlendirmede, akışkan hacmi, püskürtme paterni, akış düzgünlüğü, hüzmeye açısı ve püskürtme genişliği gibi temel püskürtme özellikleri belirleyici olmaktadır (Çömlek & Sayıncı, 2023). Kimyasal mücadelede kullanılacak etkili maddenin enine dağılımını önceden belirlemek, bitki koruma makinelerinin ilaçlama performansını sürdürülebilir kılmak, uygulama etkinliğini artırmak ve püskürtme memelerindeki olası imalat hatalarını ya da kullanım sürecinde iç yüzeylerin aşınmasına bağlı performans düşüşlerini tespit etmek amacıyla çeşitli püskürtme testleri yürütülmektedir.

Bitki koruma makinelerinde pülverizasyon sürecinin en kritik bileşenlerinden biri püskürtme memeleridir. Püskürtme uygulamaları performansını değerlendirmede kullanılan en temel ölçüt hacimsel dağılım düzgünlüğüdür (Çomaklı, 2024). Hacimsel dağılım düzgünlüğüyle ilgili yapılan püskürtme testlerinde paternatör cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Püskürtülen etkili maddenin hedef yüzeyde hacimsel dağılım düzgünlüğü, uluslararası standartlarda (ISO 16119-2 & ISO 16122) belirtilen gereksinimlere göre, yatay bumlu püskürtücülerin değerlendirilmesi amacıyla resmi olarak belirlenmiş ölçüm yöntemlerinden birisidir (Gil et al., 2021).

Yatay paternatörler yüzeysel ve şeritsel ilaçlama yapan veya yatay düzlem (tarla yüzeyi) üzerine püskürtme memelerinin dağılım düzgünlüğünü belirlemektedir. Dikey paternatörler düşey düzlemde ilaçlama veya bağ kanopi yüzeylerine ilaçlama yapan yardımcı hava akımlı püskürtme memelerinin dağılım düzgünlüğünü belirlemektedir (Çömlek, 2017). Doğrusal hareketli bir platform üzerinde toplama kanalları ve her bir kanalın altında dijital ölçüm seviyesine sahip ölçü silindirleri bulunan standart mekanik paternatörlere kıyasla, daha küçük boyutlarda tasarlanmış mobil sistemler de kullanılmaktadır.

Pestisit uygulamalarında hacimsel dağılım düzgünlüğünün değerlendirilmesine yönelik paternatörlerle ilgili çalışmaları belirlemek amacıyla, veriler Elsevier tarafından sağlanan Scopus veri tabanından elde edilmiştir. Scopus veri tabanında “patternator” anahtar kelimesi kullanılarak

gerçekleştirilen tarama sonucunda toplam 207 bilimsel yayın tespit edilmiştir. Araştırma kapsamında, bitki koruma makineleri dışındaki disiplinlere ait çalışmaların çıkarılması amacıyla ek filtreler uygulanmıştır. Yayın yılına ilişkin herhangi bir sınırlama yapılmaksızın yürütülen bu tarama sonucunda elde edilen yayınların %60'ından fazlasının tarımsal püskürtme testlerine odaklandığı belirlenmiş ve bu doğrultuda tarımsal püskürtme testleri ekseninde şekillenen bir veri seti oluşturulmuştur (Elsevier, 2025). Elde edilen bibliyografik veriler CSV formatında dışa aktarılmış ve bibliyometrik analiz sürecinde VOSviewer (sürüm 1.6.20) yazılımı kullanılmıştır (Van Eck & Waltman, 2010). Yayınlarından elde edilen anahtar kelime kullanım sıklıklarına ilişkin analiz sonuçları Şekil 1'de sunulmuştur.

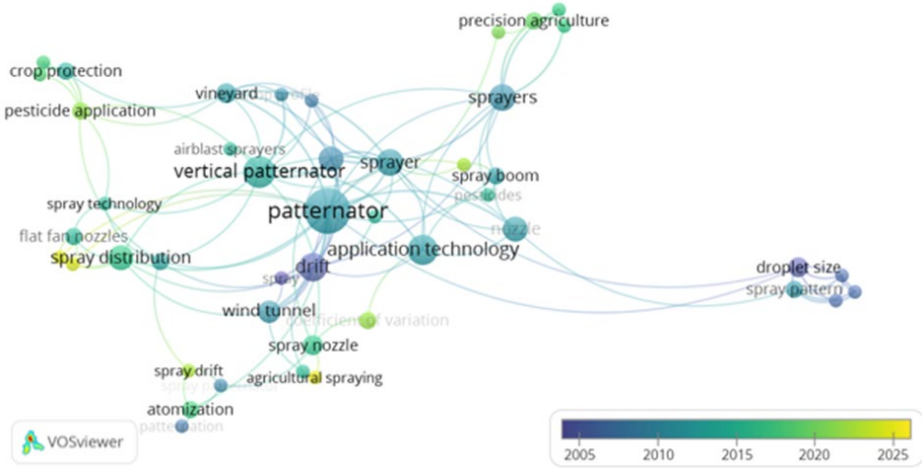


Şekil 1. Anahtar kelime ağ haritası

Anahtar kelime ağı incelendiğinde, çalışmaların toplamda dokuz ana kümeye ayrıldığı görülmektedir. Bu kümeler, paternatör kullanımının farklı yönleriyle ilişkili tematik alanları ortaya koymaktadır. Şekil 1'e göre, "patternator", "spray", "drift" ve "wind tunnel" anahtar kelimeleri etrafında şekillenen küme, özellikle sıçrama ve sürüklenme davranışının belirlenmesine yönelik laboratuvar kontrollü püskürtme deneylerini temsil etmektedir. Bu küme, paternatör tabanlı deneysel çalışmaların temel araştırma eksenini oluşturmaktadır. Diğer bir kümede "vertical patternator", "sprayer", "airblast sprayer" ve "vineyard" gibi anahtar kelimeler yer almakta olup, meyve bahçelerinde kullanılan hava akımı destekli püskürtücülerin dikey dağılım

düzensizliğinin değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Bitki kanopisi yapılarının ilaç dağılımına etkisini inceleyen çalışmalar bu grupta yoğunlaşmaktadır. Pnömatik püskürtme ilkesine dayanan sistemleri temsil eden “atomization” ve “spray drift” anahtar kelimeleri, damlacık oluşumu, parçalanma mekanizmaları ve sürüklenme dinamiklerine odaklanan araştırmalarla ilişkilidir ve bu çalışmaların paternatör testleriyle yakın bağlantısı bulunmaktadır. Hidrolik enerjiyle çalışan püskürtme memelerini temsil eden “flat fan nozzles”, “spray distribution” ve “spray technology” anahtar kelimeleri ise memelerin hacimsel dağılım düzensizliğinin belirlenmesine yönelik temel paternatör çalışmalarını içermektedir. Tarımsal püskürtme teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak bu alandaki yayın sayısında belirgin bir artış gözlenmektedir. Gelişen tarım teknolojilerinin uygulamalarıyla ilişkili “precision agriculture” ve “sprayers” anahtar kelimeleri, hassas tarımda sürüklenmenin azaltılması ve dağılım düzensizliğinin artırılmasına yönelik paternatör tabanlı performans değerlendirmelerini öne çıkarmaktadır. Damla çapı ve püskürtme deseni temelli çalışmalar “droplet size” ve “spray pattern” anahtar kelimeleri ile temsil edilmekte olup, bu küme damlacık boyutu ve püskürtme deseninin paternatör ölçümleriyle ilişkilendirildiğini göstermektedir. Tarımsal üretimde kaçınılmaz olarak kullanılan pestisitlerin ürün koruma etkinliğini yansıtan “crop protection” ve “pesticide application” anahtar kelimeleri, paternatör çalışmalarının pestisit uygulama verimliliği ve bitki koruma performansı ile doğrudan ilişkisini ortaya koymaktadır. Püskürtme ünitelerinde kullanılan bileşenlerin uygunluğunun değerlendirilmesine yönelik “spray boom”, “nozzle”, “uniformity” ve “coefficient of variation” anahtar kelimeleri ise paternatör testlerinde bom üzerindeki hacimsel dağılım düzensizliğini değerlendirmek için kullanılan temel performans göstergelerini temsil etmektedir. Özellikle varyasyon katsayısı (CV), hacimsel dağılımın homojenliğini belirlemede kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Genel ağ yapısı incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunluğunun paternatör merkezli bir yapıda toplandığı; temaların ise uygulama teknolojisi, hassas tarım, sürdürülebilirlik ve sürüklenme yönetimi olmak üzere dört ana araştırma ekseninde kümelendiği görülmektedir. Bu durum, paternatörlerin hem tarımsal ilaçlama performansının değerlendirilmesinde hem de çevresel etkilerin azaltılmasında önemli bir araştırma aracı olduğunu göstermektedir (Şekil 1).

Paternatör merkezli çalışmalarının son yirmi yılda zaman içerisinde değişimleri Şekil 2’de gösterilmiştir.

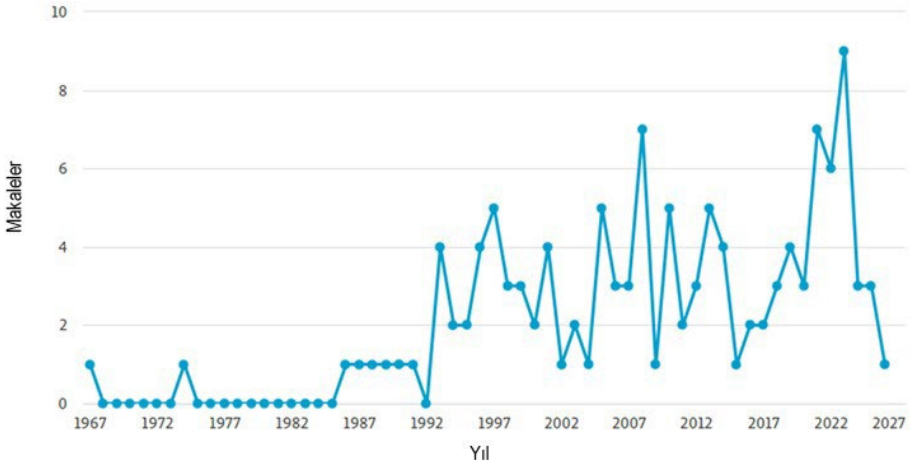


Şekil 2. Anahtar kelime zaman haritası

Paternatör ile yürütülen çalışmaların son yirmi yıldaki gelişimi incelendiğinde, araştırma eğilimlerinin zaman içerisinde belirgin bir değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. 2005 yılı ve öncesine ait dönem haritada koyu mavi tonlarda gösterilen “spray”, “drift” ve “droplet size” anahtar kelimeleri ile temsil edilmektedir. Bu durum, paternatör kullanımının başlangıç yıllarında araştırmaların ağırlıklı olarak damlacık boyutu, püskürtme karakteristikleri ve sürüklenmenin temel dinamiklerinin belirlenmesine odaklandığını ortaya koymaktadır. 2005-2010 yılları arasında, paternatör çalışmalarında konular çeşitlenmiş; sürüklenme araştırmalarının yanı sıra püskürtme memesi özellikleri, meme konum ve yükseklik ayarlarının dağılım düzgünlüğüne etkisi, hava akımı destekli testler ve yatay dağılım desenlerinin belirlenmesi gibi uygulama odaklı çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. 2010 sonrası dönemde, haritada mavi-yeşil tonlarda görülen “vertical patternator”, “sprayer” ve “airblast sprayers” kelimeleri dikey paternatörlerin kullanımının arttığını ve özellikle meyve bahçelerinde hava akımlı püskürtme makinelerinin dağılım performansının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların ivme kazandığını göstermektedir. Bu dönem, paternatör teknolojisinin bahçe bitkileri ve kanopi yapılarının korunmasına yönelik uyarlanması açısından kritik bir aşamadır. 2015-2020 yılları arasında, anahtar kelimeler “precision agriculture”,

“coefficient of variation”, “spray distribution” ve “pesticide application” etrafında yoğunlaşmış olup araştırmaların hassas tarım uygulamaları, hacimsel dağılım düzgünlüğü, varyasyon katsayısı ile performans değerlendirme ve pestisit etkinliğinin artırılması gibi daha ileri analiz yöntemlerine yöneldiği anlaşılmaktadır. 2020-2025 döneminde, haritada sarı tonlarla ifade edilen daha güncel çalışmalar “spray pattern”, “droplet size”, “distribution uniformity” ve “drift” kelimeleri ile temsil edilmekte ve bu durum sürüklenme sonrası kayıpların modellenmesi, dağılım deseninin iyileştirilmesi, pestisit tasarrufu ve çevresel etki azaltma temalarının öne çıktığını göstermektedir. Özellikle hassas tarım teknolojilerinin yaygınlaşması ile birlikte paternatör çalışmalarının güncelliğini koruduğu gözlenmektedir. Genel ağ yapısı paternatör kullanımının günümüzde hâlâ pestisit uygulama etkinliğinin artırılması, sürüklenme yönetimi ve tarımsal ilaçlamada sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli bir araştırma aracı olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 2).

Şekil 3’te Scopus veri tabanında günümüze kadar paternatörlerle ilgili yapılan çalışma sayıları verilmiştir (Elsevier, 2025).

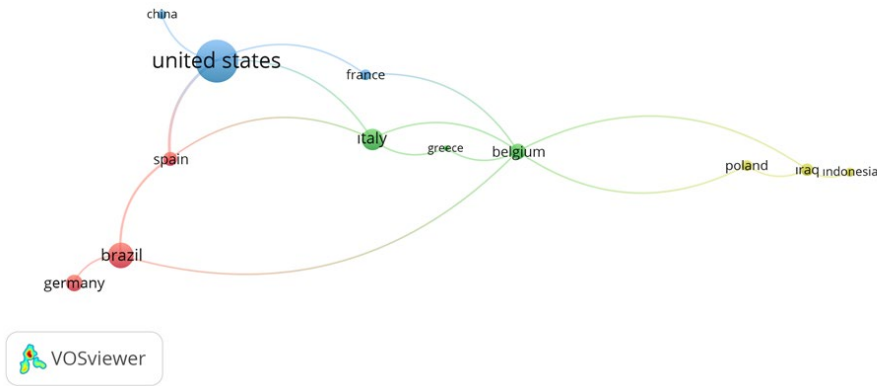


Şekil 3. 1967-2025 yılları arasında Scopus veri tabanında paternatörlerle ilgili yayın sayıları

Paternatör test düzenekleri ile yürütülen çalışmaların yıllara göre dağılımı incelendiğinde, 1992 yılına kadar Scopus veri tabanında oldukça sınırlı bir yayın üretimi olduğu görülmektedir. 1967-1992 döneminde yalnızca tekil çalışmalar yapılmış, bu süreç boyunca literatür neredeyse durağan bir seyir

izlemiştir. 1993 yılında dört adet yayının yapılmasıyla birlikte alanda belirgin bir artış eğilimi başlamıştır. Bu yıl, paternatör çalışmalarının bilimsel literatürde görünür hâle geldiği ilk kırılma noktası olarak değerlendirilebilir. Sonraki 27 yıllık süreçte yayın sayıları dalgalı bir artış göstermiştir. Bazı yıllarda yükselişler görülürken, takip eden yıllarda düşüşler yaşanmış; dolayısıyla literatürde süreklilik gösteren bir artış eğiliminden ziyade periyodik yoğunlaşmalar ve gevşemeler dikkat çekmiştir. Zaman serisinde en yüksek üretim 2023 yılında dokuz yayın ile gerçekleşmiştir. Bu değer, paternatör çalışmalarının tarihsel süreçte ulaştığı en yüksek yıllık yayın sayısını temsil etmekte olup, alana yönelik ilginin özellikle son yıllarda arttığını göstermektedir. İkinci en yüksek üretim yılı ise 2008 yılıdır; bu yılda toplam yedi adet yayın gerçekleştirilmiştir. 2008-2023 arasındaki dönem genel olarak incelendiğinde, yayınların hem frekans hem de çeşitlilik açısından önceki dönemlere göre çok daha yoğun olduğu görülmektedir. Genel eğilim değerlendirildiğinde, paternatör çalışmalarının sürekli bir dalgalı seyir izlediği, belirli yıllarda artışa geçen ancak sonrasında tekrar düşüşe geçen bir yayın dinamiğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, paternatör alanının hâlen gelişime açık olduğunu ve güncel çalışmalarla desteklenmesi gereken bir araştırma alanı niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır.

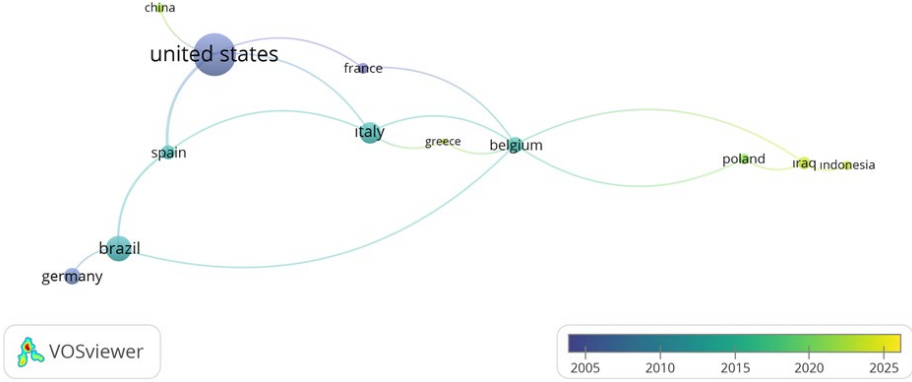
Yürütülen çalışmaların ülkeler düzeyinde ağ haritası Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Ülkelerin ağ haritası

Şekil 4’te sunulan uluslararası iş birliği ağı, ülkelerin paternatör ve püskürtme teknolojileri alanında yürüttükleri ortak yayınların oluşturduğu bilimsel iş birliği yapısını göstermektedir. Haritadaki renkler, ülkelerin kendi içlerinde daha yoğun etkileşim sergilediği tematik kümeleri temsil etmektedir. Ağın en belirgin kümesi olan yeşil kümede, Belçika merkezî bir konumda yer almakta ve en geniş bağlantı yapısına sahip ülke olarak öne çıkmaktadır. Belçika’nın İtalya, Yunanistan, Brezilya, Fransa, Polonya ve Irak ile kurduğu güçlü bilimsel ilişkiler, ülkenin paternatör kullanımı ve püskürtme teknolojileri araştırmalarında uluslararası bir odak noktası hâline geldiğini göstermektedir. Mor kümede, Amerika Birleşik Devletleri ikinci bir merkez ülke olarak konumlanmakta ve Çin, İspanya, Fransa ve İtalya ile dikkate değer düzeyde iş birliği ağları oluşturmaktadır. Bu yapı, ABD’nin küresel ölçekte araştırma üretiminde etkin rol oynadığını ve literatüre yön veren aktörlerden biri olduğunu doğrulamaktadır. Kırmızı kümede, Brezilya belirgin biçimde öne çıkmakta ve Almanya, Yunanistan ile Belçika arasında köprü görevi üstlenen bir iş birliği ağı sergilemektedir. Brezilya’nın özellikle tarımsal pülverizasyon ve hava destekli püskürtme çalışmalarındaki etkinliği, bu konumlanmayı desteklemektedir. Mavi kümede, Fransa görece daha az merkezî olmakla birlikte hem Amerika Birleşik Devletleri hem de Belçika ile anlamlı ortaklıklar kurarak küresel ağın önemli bir parçası hâline gelmektedir. Sarı kümede ise Irak, Polonya ve Endonezya’nın yer aldığı daha küçük, ancak kendi içinde güçlü bağlantılara sahip bir iş birliği yapısı görülmektedir. Bu ülkeler arasında karşılıklı bilimsel etkileşim bulunmasına rağmen, ağın genel yapısı içerisinde görece çevresel konumdadırlar. Türkiye açısından bakıldığında, Scopus üzerinde toplam üç yayının bulunmasına rağmen uluslararası düzeyde ortak yayın ilişkisi tespit edilmemiştir. Bu durum, Türkiye’nin alana katkı sağladığını ancak uluslararası iş birliği yoğunluğunun diğer ülkelere kıyasla sınırlı kaldığını göstermektedir. Genel olarak ağ yapısı, Belçika’nın merkezde konumlandığı güçlü birçok uluslu iş birliği ekosistemine işaret etmekte; diğer kümeler ise ağı tamamlayan bölgesel veya tematik iş birliği gruplarını temsil etmektedir. Bu görüntü, paternatör ve püskürtme teknolojilerine ilişkin bilimsel üretimin özellikle Avrupa ve Amerika merkezli kümelenmeler etrafında şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5'te sunulan zaman eksenli ülke ağ haritası, paternatör çalışmalarının ülkelere göre hangi dönemlerde ortaya çıktığını ve araştırma yoğunluğunun zaman içinde nasıl geliştiğini göstermektedir.

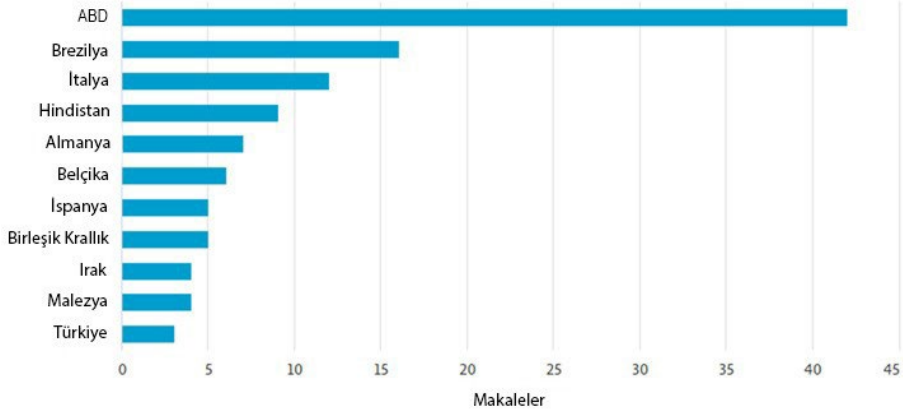


Şekil 5. Ülkelerin zaman haritası

Mor renkli kümeler, 2005’li yılların başında paternatör çalışmalarına katkı sunan ülkeleri göstermektedir. Buna göre Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve Fransa, paternatör ve püskürtme teknolojileri üzerine en erken dönem araştırmaların yürütüldüğü ülkeler olarak öne çıkmaktadır. Bu ülkeler literatürün başlangıç dönemlerinde ölçüm teknikleri, püskürtme üniformitesi ve damlacık davranışlarının değerlendirilmesine yönelik temel çalışmaları gerçekleştirmiştir. 2010 sonrası dönemde, haritada mavi ve turkuaz tonlarla gösterilen İtalya, Belçika, İspanya ve Brezilya alana katkı sunmaya başlamıştır. Bu durum, paternatör uygulamalarının özellikle Avrupa ve Güney Amerika’da yaygınlaştığını göstermektedir. 2010 sonrası genel eğilim, paternatör kullanımının küresel ölçekte belirgin şekilde genişlediğine işaret etmektedir. Açık yeşil tonlarla gösterilen Çin ve Polonya, 2015-2020 yılları arasında paternatör literatüründe görünür hâle gelmiştir. 2020 yılı ve sonrasında, sarı tonlarla temsil edilen Irak ve Endonezya paternatör alanında yeni çalışmalar üretmeye başlayan ülkeler olarak görülmektedir. Bu dönem, paternatör araştırmalarının Asya bölgesine doğru yayılım gösterdiğini ve alandaki bilimsel çeşitliliğin arttığını ortaya koymaktadır. Genel olarak zaman haritası, paternatör çalışmalarının başlangıçta ABD ve Avrupa merkezli olduğunu, zamanla Güney

Amerika ve Asya'ya yayıldığını, özellikle son yıllarda Asya ülkelerinde hızlı bir artış eğilimi bulunduğunu göstermektedir (Şekil 5).

Şekil 6'da Scopus veri tabanında günümüze kadar ülkelerin yaptıkları çalışma sayıları verilmiştir (Elsevier, 2025).



Şekil 6. 1967-2025 yılları arası Scopus veri tabanında paternatörlerle ilgili Ülkelerin yayın sayıları

Şekil 6'ya göre, günümüze kadar paternatör kullanılarak gerçekleştirilen bilimsel çalışmaların ülkelere göre dağılımı incelendiğinde, Amerika Birleşik Devletleri 42 yayın ile açık ara birinci sırada yer almaktadır. İkinci sırada 16 yayın ile Brezilya, üçüncü sırada 12 yayın ile İtalya bulunmaktadır. Genel dağılım incelendiğinde, paternatör araştırmalarının Amerika ve Avrupa merkezli olduğu görülmektedir. Özellikle ABD, İtalya ve Belçika bilgi üretiminde en baskın ülkeler olarak öne çıkmaktadır. Dikkat çekici bir bulgu olarak, Irak ve Malezya'nın son (Şekil 5.) yıllarda ürettikleri yayınlarla dünya genelindeki ilk on ülke arasında yer almaya başladığı görülmektedir. Bu durum, paternatör ve püskürtme teknolojilerine ilişkin araştırmaların coğrafi olarak çeşitlendiğini ve özellikle Asya bölgesinde yeni araştırma merkezlerinin oluştuğunu göstermektedir. Türkiye ise 1967-2025 yılları arasında toplam üç yayın ile sınırlı bir katkı sunmuştur. Bu durum, ülkemizde paternatör ve püskürtme test altyapısının sınırlı olduğunu ve bu alana yönelik laboratuvar, cihaz ve araştırma olanaklarının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

ISO 16119 standardı, pülverizatörler için asgari çevresel gereklilikleri tanımlamakta olup, özellikle bitki koruma uygulamalarında çevresel etkinin en aza indirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda standart, aşağıdaki temel prensipleri esas almaktadır:

- Etkili maddenin hedef yüzeye etkin tutunması ve düzgün dağılımının sağlanması,
- Bitki koruma ürünlerinin çevreye istem dışı yayılımının azaltılması,
- Bitki koruma ekipmanlarının kullanım, bakım ve işletim güvenliğinin iyileştirilmesi.

ISO 5682-1:2017 standardına göre, püskürtme memelerinin yatay enine dağılımının değerlendirilmesinde kullanılan üç temel yöntem bulunmaktadır:

- Püskürtülen sıvı hacminin yatay enine dağılımı,
- Meme debisinin yatay enine dağılımı,
- Meme ucundaki basıncın yatay enine dağılımı.

Bu yöntemler, yatay dağılımın farklı yönlerini analiz etmekte olup birbirini tamamlayıcı niteliktedir.

ISO 5682-1:2017 standardının madde 5'e göre, yatay paternatörlerle yapılan püskürtme testleri, püskürtme çubuğunun (bomun) tamamı üzerinde gerçekleştirilmelidir. Ölçümler tek bir meme veya yan yana birkaç meme kullanılarak yapılabilir; ancak test süresince püskürtme çubuğu üzerindeki tüm memeler aktif olarak püskürtme yapmalıdır. ISO 5682-1:2017 standardının madde 6.4'e göre yatay paternatörlerde püskürtme test kurulumu aşağıdaki unsurları içermelidir:

- Püskürtme yüksekliği, paternatörün kanal duvarının üst kısmı ile püskürtme memesinin çıkış orifisi arasındaki dikey mesafe olarak belirlenmelidir.
- Yelpaze hüzmeli memeler, test sırasında püskürtme deseninin en geniş doğrultusu paternatör kanallarına dik olacak şekilde veya üreticinin tanımladığı normal çalışma açısında konumlandırılmalıdır.
- Memeler, komşu püskürtme desenlerinin çakışmasını önlemek amacıyla, üretici tarafından önerildiği şekilde, eksene dik doğrultudan 5°-15° sapma ile yerleştirilebilir.

Paternatör testlerinde ölçüm, ölçü silindirlerinde biriken sıvı hacminin dereceli hacim ölçüğüyle, ağırlık yöntemiyle veya eşdeğer bir ölçüm tekniğiyle

yapılmalıdır. Ağırlık yöntemi kullanıldığında, toplama kabı örnek almadan önce tartılmalı ve net ağırlık, ölçüm sonrası fark alınarak hesaplanmalıdır. Püskürtme devam ederken ölçü silindirlerinde toplama işlemi eş zamanlı yürütülmeli ve toplama süresi, ölçümde en fazla %1 hata payı yaratacak şekilde seçilmelidir. Toplama hacmi, skalaların okunabilirliğini ve ölçüm hassasiyetini sağlayacak seviyeye ulaşmış olmalıdır. Bu nedenle testler, yeterli deneyime sahip araştırmacılar tarafından yürütülmelidir. Püskürtme meme aralığı, komşu meme uçlarının merkezden merkeze yatay mesafesi ölçülerek doğrulanmalıdır. Meme konumu ise bom düz ve yatay bir yüzey üzerine açıldığında meme eksenlerinin ölçülmesiyle belirlenmelidir. Bu ölçümler zemine veya uygun olduğunda bom yapısına referans alınarak yapılabilir (ISO 5682-2:2017(E)).

Yatay paternatörlerde püskürtülen sıvıyı toplayan kanalların arasındaki mesafe, kanalların yüzey pürüzlülüğü ve kanalların şekilleri, hava akışındaki damlacık sıçramasını ve küçük damlacıkların hareketini kontrol ederek paternatörlerin ölçüm hassasiyeti üzerinde önemli etkiye sahip olmaktadır (Richardson et al. 1986).

Uluslararası (ISO 5682-1 & 5682-2) standartlara göre yatay paternatörlerin kanal özellikleri belirtilmiştir.

- İki ardışık kanal duvarı arasındaki mesafe tek bir meme için 25 veya 50 mm; çoklu memeler için 25, 50 veya 100 mm olmalıdır.
- Kanalların giriş kenarlarının yataydan sapması, genişlik boyunca $\pm\%1$ (10 mm m^{-1}) eğimi aşmamalıdır.
- Kanal yüksekliğindeki değişim, en az 1 m uzunluğunda düz bir cetvelle ölçüldüğünde 2 mm'yi aşmamalıdır.
- Kanalların giriş kenarının yataydan eğimi %10'u aşmamalıdır.
- Kanal genişliği 50 veya 100 mm olduğunda kanal derinliği 75 mm'den büyük olmalıdır.
- Kanal genişliği 100 mm olduğunda her bir kanalın giriş kenarındaki doğruluğu $\pm 2.0 \text{ mm m}^{-1}$ içinde olmalıdır.
- İki ardışık kanal duvarının giriş kenarları arasındaki mesafe 100 mm kanallar için $\pm 2.0 \text{ mm}$ içinde olmalıdır.

Paternatörler arasındaki farklılıkları tespit etmek amacıyla ve test düzeneklerinin standartlara uygunluğunu ortaya koymak için hidrolik memeler ile meme tipine, işletme basıncına ve püskürtme yüksekliğine bağlı olarak

püskürtme testleri yapılmıştır (Gil et al., 2021). Paternatör ölçüm tablalarının hava emişli, geniş püskürtme açılı, öne ve arkaya eşit açıda püskürtme yapabilen memelerin hacimsel dağılım düzgünlüğünü belirlenmesi için yeterli boyutlarda olmadığını belirtmişlerdir (Heinkel & Herbst 2013).

Püskürtme testlerinde yatay bir yüzeye özellikle yüksek basınçlarda sıvı jeti uygulandığında ölçüm tablasının ve akışkanın özelliklerine bağlı olarak yüzeyde yayılma, sıçrama ve yayılıp yansıma olmak üzere üç farklı sonuç görülmektedir. Hidrolik ve pnömatik püskürtme memelerinin dağılım deseninin belirlenmesi sırasında, atmosfere püskürtülen akışkan özellikle yüksek işletme basınçlarında paternatörün toplama kanallarına çarptığında damlacık sıçraması ve hava hareketleri meydana gelmektedir. Çarpma sonucu yön değiştirip geri dönen akışkan hedef ölçüm tablası yüzeyine toplanamamakla birlikte havaya sıçradığı anda türbülans oluşturmaktadır. Oluşan bu türbülansın etkisiyle püskürtülmesi devam eden akışkan parçacıkları ölçüm tablasına ulaşmadan hedef dışına iletilmektedir. Bu nedenle dağılım deseni belirlemek amacıyla yapılan püskürtme testleri hassas bir şekilde yürütülememektedir. 'Püskürtme darbesi' olarak tanımlanan bu etki, ölçüm sırasında akışkanın doğal dağılımını bozarak püskürtme deseninin doğru bir biçimde tespit edilmesini güçleştirmektedir. Buna karşılık, düşük işletme basınçlarında yürütülen denemelerde sıvının daha düşük enerjiye sahip olması sebebiyle kanal yüzeylerine yapışarak ölçü silindirlerine ulaşmadığı gözlenmektedir. Ayrıca, geniş açılı püskürtme memeleri ve büyük orifis çapına sahip memelerde tek meme paternatörlerinde püskürtme deseni ölçüm tablası dışına taşmakta, bu durum tek meme sabit paternatörlerde sağlıklı bir kalibrasyon yapılmasını engellemektedir.

Yardımcı hava akımlı püskürtücülerde etkili bir ilaçlamanın başarısı püskürtme yönü, damlacık büyüklüğü, hava hızı ve akış yönü gibi değişkenlere bağlıdır. Meyve bahçelerinde kullanılan bu tür püskürtücülerde, söz konusu püskürtme özelliklerinin yanı sıra sistemin bitki kanopi şekillerine göre ayarlanması da büyük önem taşımaktadır. Bu gereklilikten hareketle, farklı kanopi yapılarının dikkate alınabilmesi amacıyla dikey paternatörler geliştirilmiştir (Gil et al., 2013).

Bağ ve bahçe pülverizatörlerinin püskürtme performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan dikey paternatörlerde yer alan toplama panellerinin minimum teknik özellikleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Ayrık toplayıcı elemanlardan oluşan test tezgâhlarında, her bir toplama yüzeyinin boyutu en az 180×220 mm olmalıdır.
- Püskürtme bulutunun tüm yüksekliği boyunca sıvının kesintisiz şekilde toplanabilmesi için bitişik iki toplama elemanı arasındaki düşey mesafe en fazla 300 mm olmalıdır.
- Toplanan sıvı, kapasitesi en az 50 ml olan ve ölçek hassasiyeti kendi kapasitesinin %1'den büyük olmayan dereceli silindirlere aktarılmalıdır (Balsari et al., 2016).

Dikey paternatörlerde sıvı toplama elemanı olarak kullanılan lamellerin yapısal yerleşimini aynı paternatör üzerinde lamelleri hem yatay hem de dikey olarak konumlandırılmıştır. Deneme sonuçları, lameller dikey konumlandırıldığında paternatörün, yatay konumlandırılmış lamellere kıyasla aynı test koşullarında %25 daha fazla sıvı topladığını göstermiştir (Biocca & Gallo, 2014). Dikey paternatörlerde kullanılan lamel yapısının yalnızca mekanik bir unsur olmadığı dağılım ölçüm doğruluğu ve test verimliliği açısından kritik bir tasarım parametresi olduğu anlaşılmaktadır.

Meyve bahçesi bitkileri, genellikle değişken taç yüksekliği ve yoğunluğuna sahip olduğundan, pülverizatörlerin oluşturduğu dikey püskürtme deseninin doğru bir şekilde değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla kullanılan dikey paternatörler, yapısal özellikleri ve kullanım alanları dikkate alınarak altı ana grupta sınıflandırılmaktadır (Srigiri et al., 2025).

- Cornell Paternatör
- Kâğıt Paternatör
- Modifiye Cornell Paternatör
- SARE Paternatör
- Ekranlı SARE Paternatör
- Lamelli Paternatör

Yüksek taç boyuna sahip bitkilere yapılan uygulamalarda, püskürtme hedeflerinin dikey paternatör test tezgâhının yüksekliğini aşması durumunda, düşey doğrultuda belirli bir hızla ray üzerinde hareket edebilen mobil test düzenekleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, püskürtme testi sırasında ölçü silindirlerindeki sıvı seviyesi silindir hacminin en az %70'ine ulaşıncaya kadar püskürtme işlemi sürdürülmelidir (Balsari et al., 2016).

Bir yatay paternatör ile üç farklı toplama yüzeyi geometrisine sahip dikey paternatör kullanılarak gerçekleştirilen yardımcı hava akımlı püskürtme testlerinde ISO 5682 standardına uygun yatay test tezgâhında hava hızının artmasıyla birlikte, ince damlacıkların püskürtülmesi durumunda damlacıkların yüzeyden geri sıçramasının artmasına bağlı olarak geri kazanım kapasitesinde belirgin bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir (Allochis et al., 2015).

Püskürtülen akışkan, paternatör tablasında kanallarda toplanmakta ve her kanalda biriken sıvı, akışkan transfer hattı aracılığıyla toplama silindirlerine iletilmektedir. Püskürtme dağılım düzgünlüğünün hızlı bir şekilde ölçülmesine yönelik yaklaşımlar zaman içerisinde önemli bir gelişim göstermiştir. Başlangıçta gerçekleştirilen değerlendirmeler, skalalı ölçüm silindirleri üzerindeki değerlerin manuel olarak okunmasına dayandığından hem insan hatasına açık olmuş hem de oldukça zaman almıştır. Bu sistemleri otomatikleştirmeye yönelik ilk girişimler, toplanan sıvının ağırlığını ölçmek amacıyla yük hücrelerinin kullanılmasına dayanmıştır (Carpenter et al., 1988). Bu yöntemler veri toplamak için gereken iş gücü ve süreyi önemli ölçüde azaltmış olsa da, hareketli parçalardan kaynaklanan titreşimler sistemin sürdürülebilirliği açısından risk oluşturmaktadır.

Elektronik donanıma sahip paternatörler, mekanik sistemlere kıyasla daha pratik bir kullanım sunmakta ve ölçümleri oldukça hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmekte ancak bu cihazların üretim maliyetleri oldukça yüksektir. (Çömlek & Sayıncı 2023). Dijital okuma yapabilen paternatör sistemlerinde kullanılan cihazların mekanik titreşimlerden olumsuz etkilenmesi ve denemeler esnasında söz konusu parçaların püskürtülen akışkan ile teması kaçınılmaz olmaktadır. Denemelerden önce elektronik cihazların kalibre edilmeleri test sonuçlarının doğruluğu açısından önem taşıırken araştırmacılar için iş gücünün artmasına ve zaman kaybına neden olmaktadır. Otomatik ölçme sistemlerinde hareket iletim organlarında yapılacak yeni tasarımlar beraberinde toplam maliyeti de artıracaktır.

Paternatörün toplama silindirlerinde biriken akışkanın seviyesini ölçmek için dijital sıvı seviye sensörleri (Luck et al., 2016), silindirlerinin üzerinde ultrasonik ve optik (lazer) sensörle donatılmış doğrusal hareketli bir tarayıcı ile akışkanın seviyesi (Sehsah, 2016) ve küçük hacimli toplama silindirlerinin dolma zamanı esas alınarak (Višacki et al., 2017) yöntemleri ile belirlenmiştir. Püskürtme dağılımını belirlemek için kullanılan bir diğer yöntem görüntü

işlemedir. Mekanik paternatörlerde püskürtme deseninin belirlenmesinde kullanılan sensör tabanlı elektronik ölçme sistemlerine alternatif olabilecek düşük maliyetli, fonksiyonel ve kullanışlı bir görüntü işleme yöntemi geliştirmişlerdir (Çomaklı & Sayıncı, 2025)

İsviçre’de püskürtme dronlarının (İHA) homologasyon sürecinde uygulanacak püskürtme testleri için yatay paternatörün teknik boyutları belirlenmiştir. Buna göre, yatay paternatör en az 3 m genişliğinde, 6 m uzunluğunda ve drone’un uygulama genişliğinin en az 1.5 katı uzunlukta olacak şekilde kanallı bir yapıda olmalıdır. Paternatör üzerindeki kanallarda toplanan sıvı miktarlarının varyasyon katsayısı (CV), üç tekerrürün ortalaması alınarak değerlendirilmekte olup, en fazla %15 olması gerekmektedir (Anken, 2018).

2. SONUÇ

Geleneksel olarak kullanılan test düzeneklerinin üretim maliyetleri yüksek, kütleli olarak ağır ve kalibre edilmeleri noktasında yeterince hassasiyeti olmayan test düzenekleridir. Ticari olarak üretilen paternatörlerin bireysel yetiştiriciler tarafından temin edilmesi oldukça maliyetli olmakta ve bu cihazlar saha koşullarına kolaylıkla uyarlanamamaktadır. Günümüzde kullanılan sabit yatay paternatörlerin büyük bir bölümü, taşınabilirliklerinin sınırlı olması nedeniyle laboratuvar ortamında kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Geleneksel olarak kullanılan test düzenekleri:

- Üretim maliyetleri yüksek,
- Kütleli olarak ağır,
- Kolaylıkla konumları değiştirilememekte,
- Tüm püskürtme memelerinin ıslatma genişliğini temsil etme noktasında kısıtlı yapıda olmaları,
- Denemelerde tekerrürler arası standart sapmanın yüksek düzeyde tespit edilmesi,
- Püskürtülen sıvının çarpma sonucu kanallardan çıkarak ölçüm tüplerine iletilmemesi,
- Sıçrayan sıvı partiküllerinin beraberinde ölçüm tablasına düşmekte olan damlaları hedef dışına taşınması,
- Sıvı seviyesini belirlemek için kullanılan elektronik aygıtların zamanla hassasiyetini kaybetmeleri,

- Kalibre edilmeleri noktasında yeterince hassasiyeti olmayan test düzenekleridir.

Bu dezavantajlar, sabit paternatörlerin Ar-Ge çalışmaları ile eğitim-öğretim faaliyetlerinde beklenen gereksinimleri karşılamasını güçleştirmektedir. Ülkemizde püskürtme testleri sınırlı sayıda kuruluş tarafından yürütülmektedir. Kullanılan mevcut test düzenekleri yurtdışından ithal edilmekte ve yüksek maliyetle temin edilebilmektedir. Püskürtme test düzeneklerinin temin edilme noktasında yurt dışına bağımlılığı ortadan kaldıracak yerli ve milli test düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, pestisit uygulamalarında kullanılan püskürtme memelerinin daha hassas ve hızlı okuma yapabilen test sistemleri ile değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Not:

Bu kitap bölümü, 10–12 Eylül 2025 tarihlerinde düzenlenen 36. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi kapsamında sunulan ve bildiri özet kitabında özet olarak yayımlanan çalışmanın genişletilmiş ve yeniden düzenlenmiş hâlidir.

KAYNAKÇA

- Anken, T. (2018). Homologation and inspection of spray drones in Switzerland. *SPISE* 7, 196, 211.
- Allochis, D., Balsari, P., Tamagnone, M., Marucco, P., Vai, P., & Bozzer, C. (2015). Performances evaluation of different vertical patternators. *Julius-Kühn-Archiv*, (449), 120. <https://doi.org/10.5073/jka.2015.449.0021>
- Balsari, P., Herbst, A., & Langenakens, J. (2016). Advice for bush and tree crop sprayer adjustment. *SPISE ADVICE*, 2016(01), 1-20.
- Biocca, M., & Gallo, P. (2014). Comparison between horizontal and vertical lamellate patternators for air-blast sprayers.
- Butts, T. R., Luck, J. D., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., & Kruger, G. R. (2019). Evaluation of spray pattern uniformity using three unique analyses as impacted by nozzle, pressure, and pulse-width modulation duty cycle. *Pest Management Science*, 75(7), 1875-1886. <https://doi.org/10.1002/ps.5352>
- Carpenter, T. G., Reichard, D. L., Ozkan, H. E., Holmes, R. G., & Thornton, E. (1988). Computerized weighing system for analyses of nozzle spray distribution. *Transactions of the ASAE*, 31(2), 375-0379.
- Çomaklı, M. (2024). Strok hareketli püskürtme test tarayıcısı prototipinin tasarımı ve üretimi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>
- Çomaklı, M., & Sayıncı, B. (2025). A Novel Image-Based Method for Measuring Spray Pattern Distribution in a Mechanical Patternator. *Agriculture*, 15(22), 2337. <https://doi.org/10.3390/agriculture15222337>
- Çömlek, R. (2017). Püskürtme paterni test ünitesinin tasarımı, imalatı ve pülverizatör memelerinde akış kontrolü. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp>
- Çömlek, R., & Sayıncı, B. (2023). Mekanik Püskürtme Paternatörü Tasarımı, Prototip İmalatı ve Pülverizatör Memelerinde Akış Testleri. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 38(3), 597-618.

- Elsevier. (2025). Scopus database: Search query TITLE-ABS-KEY (“patternator”). Retrieved Month Day, Year, from <https://www.scopus.com>
- Elwakeel, A. E., Ahmed, S. F., Zein Eldin, A. M., & Nasrat, L. (2021). Effect of spraying height, pressure, and nozzle type on flow characteristics of a field sprayer. *Al-Azhar Journal of Agricultural Engineering*, 1(1), 29-38.
- FAO. (2023). Inputs and Pesticide use. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., Adkins, S. W., Hewitt, A. J., Chauhan, B. S., Kruger, G. R., & O'Donnell, C. C. (2018). Effect of spray droplet size on herbicide efficacy on four winter annual grasses. *Crop Protection*, 112, 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.05.020>
- Gil Moya, E., Landers, A., Gallart González-Palacio, M., & Llorens Calveras, J. (2013). Development of two portable patternators to improve drift control and operator training in the operation of vineyard sprayers. *Spanish journal of agricultural research*, (3), 615-625. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013113-3638>
- Gil, E., Bueno, M., Campos, J., Gallart, M., & Da Cunha, J. P. (2021). Evaluation of horizontal patternators according to international standard requirements for boom sprayers. *Transactions of the ASABE*, 64(5), 1635-1646. <https://doi.org/10.13031/trans.14086>
- Grella, M., Marucco, P., Resecco, M., Bozzer, C., Biglia, A., Comba, L., ... & Gioelli, F. (2022, September). The Effect of Adjuvants in Reducing Potential Spray Drift. *In Conference of the Italian Society of Agricultural Engineering (pp. 597-604)*. Cham: Springer International Publishing.
- Heinkel, R., & Herbst, E. (2013). Uniform cross distribution of double flat spray nozzles may be affected by the design of the sprayer. *Julius-Kühn-Archiv*, (439), 191. <https://doi.org/10.5073/jka.2012.439.038>
- Hewitt, A. J. (2000). Spray drift: impact of requirements to protect the environment. *Crop Protection*, 19(8-10), 623-627. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00082-X)
- ISO. (2013). 16119-2: Agricultural and forestry machinery, Environmental requirements for sprayers - Part 2: Horizontal boom sprayers. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

- ISO. (2015). 16122: Agricultural and forestry machinery, Inspection of sprayer and liquid fertilizer in use - Part 1, General; Part 2, Boom sprayers; Part 3, Sprayers for bush and trees. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO. (2017a). 5682-1: Equipment for crop protection, Spraying equipment - Part 1: Test methods for sprayer nozzles. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO. (2017b). 5682-2: Equipment for crop protection, Spraying equipment - Part 2: Test methods for hydraulic sprayer liquid delivery system. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Luck, J. D., Schaardt, W. A., Sharda, A., & Forney, S. H. (2016). Development and evaluation of an automated spray patternator using digital liquid level sensors. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(1), 47-52. <https://doi.org/10.13031/aea.32.11381>
- Manalil, S., Busi, R., Renton, M., & Powles, S. B. (2011). Rapid evolution of herbicide resistance by low herbicide dosages. *Weed Science*, 59(2), 210-217. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00111.1>
- Richardson, R. G., Combellack, J. H., & Andrew, L. (1986). Evaluation of a spray nozzle patternator. *Crop protection*, 5(1), 8-11.
- Sehsah, E.M.E. Vertical Patternator for Evaluation of the Hydraulic Sprayers. *Misr J. Agric. Eng.* 2016, 33, 1239-1254. <https://doi.org/10.21608/mjae.2016.97595>.
- Srigiri, D., Sunil, S., Vijayakumar, P., Sreenivas, A. G., & Pampanna, Y. (2025). Techniques for Assessment of Vertical Spray Pattern: A Review. *Archives of Current Research International*, 25(5), 331-342. <https://doi.org/10.9734/acri/2025/v25i51213>
- Van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Višacki, V.; Sedlar, A.; Bugarin, R.; Turan, J.; Burg, P. Effect of Pressure on the Uniformity of Nozzles Transverse Distribution and Mathematical Model Development. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendel. Brun.* 2017, 65, 563-568. <https://doi.org/10.11118/actaun201765020563>.

BÖLÜM 2

COĞRAFİ YAPAY ZEKÂ (GEOAI): KAVRAMSAL ÇERÇEVE, UYGULAMA ALANLARI VE TARIM SEKTÖRÜNDEKİ POTANSİYELİ

Dr. Öğr. Üyesi Gülden ÖZGÜNALTAY ERTUĞRUL¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18166877>

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü,
Kırşehir, Türkiye. gozgunaltay@ahievran.edu.tr, orcid id: 0000-0002-8433-1872

1. GİRİŞ

Bu bölüm, Coğrafi Yapay Zekânın (GeoAI) kavramsal çerçevesini, ortaya çıkışını tetikleyen teknolojik gelişmeleri, küresel araştırma gündemindeki yerini ve Türkiye'deki mekânsal bilgi endüstrisi bağlamındaki kritik literatür boşluğunu ele almaktadır.

1.1. Dijital dönüşüm, mekânsal veri artışı ve yapay zekâ teknolojilerinin kesişimi

Günümüzde coğrafi/mekânsal veriler ve haritalar, yaşamın giderek artan önemli bir parçası haline gelmektedir (Uluğtekin, Başaraner, Güney, & Doğru, 2021). Son yirmi yılda yaşanan teknolojik gelişmeler, mekânsal veri üretimi ve kullanımı anlayışında köklü değişikliklere yol açmıştır (Uluğtekin et al., 2021). Özellikle son on yılda, coğrafi bilgiye ilişkin kitlesel kaynak kullanımının (crowdsourcing) artması, harita oluşturma sürecini uzmanların elinden gönüllü katkıda bulunanların ellerine kaydırarak mekânsal alanda bir devrim yaratmıştır (Uluğtekin et al., 2021).

Bu dönüşümün temel itici gücü, düşük maliyetli, düşük teknoloji ve ağ bağlantılı sensörlerin (algılayıcıların) yaygınlaşmasıdır (Uluğtekin et al., 2021). Bu durum, daha önce hayal bile edilemeyecek miktarda verinin üretilmesini sağlamış; uydulardan, insansız hava araçlarından (İHA), Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarından ve sosyal medyadan sürekli olarak muazzam hacimli veriler akmaya başlamıştır (Uluğtekin et al., 2021; Li & Hsu, 2022; Pierdicca & Paolanti, 2022). Bu süreçte ortaya çıkan büyük mekânsal veriler (Big Data), hacim, hız ve karmaşıklık gibi nitelikleriyle karakterize edilmekte ve geleneksel harita yapım yöntemlerinin bu verileri etkin bir şekilde işlemek için uyarlanmasını zorunlu kılmaktadır (Uluğtekin et al., 2021).

Bu karmaşık ve yoğun veri setlerini anlamlandırma becerisi, veri üretim yeteneğinin gerisinde kalmıştır. Bu nedenle, verilerin işlenmesiyle elde edilecek bilgilerden çok büyük değer sağlanması beklenirken, üretilen veri miktarındaki artış, doğru zamanda doğru bilgiye ulaşma gereksinimini de artırmıştır (Uluğtekin et al., 2021). Bu zorluğun üstesinden gelmek için, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Yapay Zekâ (YZ) teknolojilerinin stratejik birleştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir (Uluğtekin et al., 2021).

1.2. GeoAI kavramının ortaya çıkışı ve önemi

Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI), bu stratejik yakınlaşma noktasında ortaya çıkmıştır (Li, 2020; Li, 2021). GeoAI, hızla büyüyen multidisipliner bir araştırma alanı olarak tanımlanmakta ve uzamsal bilimdeki yenilikleri, başta Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) olmak üzere YZ yöntemlerini, veri madenciliğini ve yüksek performanslı hesaplamayı birleştirerek mekânsal büyük veriden anlamlı bilgi çıkarmayı amaçlamaktadır (Li, 2020; Vopham, Hart, Laden, & Chiang, 2018; Sahana et al., 2022; Pierdicca & Paolanti, 2022).

GeoAI, temel olarak, coğrafi bilginin (uzamsal konum, bağlam, ilişki) YZ yöntemleriyle (öğrenme, tahmin, akıl yürütme) birleşmesini temsil eder (Uluğtekin et al., 2021; Song, 2020). Gartner'a göre, GeoAI, Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) dâhil olmak üzere YZ yöntemlerinin mekânsal ve görüntü verisi analizi yoluyla bilgi üretmek için kullanılmasıdır (Fauzi, 2024). Bu, GeoAI'yı veri veya hesaplama açısından yoğun mekânsal problemler için geleceğe yönelik, umut verici bir çözüm teknolojisi olarak konumlandırmaktadır (Uluğtekin et al., 2021; Alastal & Shaqfa, 2022).

GeoAI'nın Kurumsal ve Stratejik Önemi:

1. Hızlandırılmış Problem Çözme: GeoAI, karmaşık veri kümelerinden anlam çıkarma hızını dönüştürerek dünyanın en acil sorunlarının ele alınmasına yardımcı olmaktadır (Esri, 2025). Kuruluşlar, GeoAI'yı "hızlandırılmış mekânsal problem çözme" yeteneği olarak konumlandırmaktadır (Esri, 2025; Esri, 2025).
2. Otomasyon ve Verimlilik: GeoAI, görüntü, video, nokta bulutu ve metin verilerinden otomatik bilgi çıkarma, sınıflandırma ve tespit işlemleriyle zaman tasarrufu sağlar (Esri, 2025; Esri, 2025). Bu otomasyon, manuel veri oluşturma iş akışlarını kolaylaştırarak verimliliği artırır ve maliyetleri düşürür (Esri, 2025). Ulusal harita kurumları, GeoAI otomasyonu sayesinde ulusal CBS'yi aylar veya günler yerine saatler içinde hızlı bir şekilde güncelleyebilir (Esri, 2025).
3. Tahmine Dayalı Analiz: Makine öğrenimi ile GeoAI, mekânsal algoritmalar kullanarak kümeleri tespit etme, değişimi hesaplama, kalıpları bulma ve sonuçları tahmin etme yeteneği sunar (Esri, 2025; Esri, 2025). Bu, GeoAI'nın kurumsal dirençliliği ve öngörüye dayalı

modelleme yeteneğini artırarak stratejik karar verme hızını maksimize ettiğini göstermektedir (Esri, 2025).

1.3. GeoAI'nin dünyada yükselen araştırma alanı olması

GeoAI, coğrafi bilimlerdeki mekânsal analitik için yükselen bir araştırma alanı ve ön cephe (frontier) olarak kabul edilmektedir (Li & Hsu, 2022). Bu hızlı gelişim, teorik ilerlemeler, büyük verinin mevcudiyeti, Bilgisayarlı Görü (CV) ve Derin Öğrenme (DL) tekniklerindeki atılımlar ve yüksek performanslı hesaplama platformlarının yaygınlaşmasıyla desteklenmektedir (Gao, 2021; Li & Hsu, 2022).

GeoAI, coğrafya, yer bilimleri ve YZ'yi birleştirerek, insan-çevre etkileşim sistemlerindeki temel bilimsel ve mühendislik sorunlarını çözmeyi amaçlayan disiplinler arası bir araştırma yönüdür (Song, 2020; Sahana et al., 2022). Bu alanda yetkin olmak, YZ teorisi, programlama/hesaplama pratikleri ve coğrafi alan bilgisini gerektirmektedir (Gao, 2021).

GeoAI'nın küresel önemi, uluslararası kartografya ve mekânsal bilgi yönetimi kurumlarının da gündeminde yer almaktadır:

- Uluslararası Kartografya Birliği (ICA), bilim ve toplum yararına mekânsal bilgilerden maksimum etkiyle fayda sağlanması stratejik hedefi doğrultusunda kartografya ve coğrafi bilgi bilimi ile ilgili bir araştırma gündemi hazırlamıştır (Virrantaus, Fairbain, & Kraak, 2009; Uluğtekin et al., 2021).
- Birleşmiş Milletler Küresel Mekânsal Bilgi Yönetimi (UN-GGIM) Uzmanlar Kurulu da mekânsal bilgi sektörünün geleceğine yönelik raporlar yayınlamıştır (UN-GGIM, 2015; UN-GGIM, 2020; Uluğtekin et al., 2021).

GeoAI uygulamaları, akıllı şehirler, afet yönetimi, çevresel izleme, sağlık, ulaşım ve hassas tarım gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Fauzi, 2024; Li, 2021; Sahana et al., 2022). Bu alanın küresel pazar dinamiklerinde, Mekânsal Zekâ (GeoAI) uygulamalarının yıllık büyüme oranı (CAGR) %30 düzeyinde olacağı öngörülmektedir (Guney, 2020). Bu yüksek büyüme oranı, GeoAI'nın geleceğin mekânsal bilişiminin itici gücü olduğunu açıkça göstermektedir.

1.4. Türkiye bağlamında konuya ilişkin mevcut durum ve literatür eksikliği

Küresel mekânsal bilgi endüstrisi büyük bir hızla büyürken, Türkiye'deki duruma ilişkin kapsamlı ve ölçülebilir verilere erişimde önemli bir literatür ve bilgi eksikliği bulunmaktadır (Güney, 2020).

Türkiye Mekânsal Bilgi Endüstrisi Hakkında Bilinmeyen Temel Hususlar:

- Türkiye'deki Mekânsal Bilgi Endüstrisi'nin (Coğrafi Bilgi Sistemleri dâhil) ekonomik büyüklüğü (Güney, 2020).
- Sektörün Yıllık Birleşik Büyüme Oranı (CAGR) (Güney, 2020).
- Sektörün Türkiye ekonomisine ve Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH)'ya katkısı (Güney, 2020).
- Merkezi ve yerel yönetimlerin bu alandaki yatırımlarıyla mevcut hizmetlerinde elde ettikleri tasarruf ve verimlilik artışlarının boyutu (Güney, 2020).
- Türkiye'nin uzaya göndermiş olduğu uzaktan algılama uyduları Göktürk-1 ve Göktürk-2'nin verimlilik ve üretkenlik açısından Türkiye Mekânsal Bilgi Endüstrisi'ne katkıları (Güney, 2020).

Eğer bir endüstrinin büyüklüğü ölçülemez ve yıllık büyüme/daralma oranı bilinemezse, gelecek yıllara yönelik stratejiler belirlenemez ve planlamalar yapılamaz (Güney, 2020). Türkiye'nin mekânsal bilgi sektörlerinin daha büyük katma değer üretmesi ve potansiyel işsizlik sorununu çözebilmesinin tek yolu, küresel olarak %30 düzeyinde büyüyen 'Mekânsal Zekâ (GeoAI)' uygulamalarına öncelik verilmesidir (Güney, 2020). Bu saptama, GeoAI konusuna odaklanan akademik ve teknik çalışmaların, Türkiye'deki bu kritik stratejik ve ölçülebilirlik eksikliğini gidermek açısından hayati önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

2. COĞRAFİ YAPAY ZEKÂNIN (GEOAI) KAVRAMSAL TEMELLERİ

Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI), CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) teknolojisi ve Yapay Zekâ'nın (YZ) yenilikçi yöntemlerinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan, hızla büyüyen ve çok disiplinli bir alandır (Alastal & Shaqfa, 2022; Li, 2020). Bu bölüm, GeoAI'nın kavramsal temelini, onu oluşturan kilit teknolojik

bileşenleri ve geleneksel mekânsal analitik yaklaşımlardan farkını detaylandırmaktadır.

2.1. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS), uzaktan algılama ve yapay zekânın bütünleşik kullanımı

GeoAI, yirmi birinci yüzyılın mekânsal zorluklarına çözüm sunan ve coğrafi bilginin (uzamsal konum, bağlam, ilişki) Yapay Zekâ (YZ) yöntemleriyle (öğrenme, tahmin, akıl yürütme) birleşmesiyle ortaya çıkmış bir araştırma yönelimidir (Song, 2020; Li, 2020; Uluğtekin, Başaraner, Güney, & Doğru, 2021). GeoAI, temel olarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve yapay zekâ teknolojilerinin stratejik yakınlaşmasıdır (Uluğtekin et al., 2021).

Bu füzyon, mekânsal büyük veriden anlamlı bilgi çıkarmak için mekânsal bilimdeki yenilikleri, Makine Öğrenimi (ML), Derin Öğrenme (DL), veri madenciliği ve yüksek performanslı hesaplama gibi YZ yöntemlerini kullanır (VoPham, Hart, Laden, & Chiang, 2018). GeoAI, bu stratejik entegrasyon sayesinde, karmaşık mekânsal problemlere yönelik olarak veri veya hesaplama açısından yoğun mekânsal problemler için gelecek vaat eden bir çözüm teknolojisi sunmaktadır (Uluğtekin et al., 2021).

GeoAI'nın işleyişi, temel olarak üç ana teknolojik bileşenin bir araya gelmesine dayanır.

2.2. Mekânsal veri (coğrafi veriler, konum tabanlı sensör verileri, uydu görüntüleri)

GeoAI, sadece bir coğrafi konuma (koordinatlar veya adresler) sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda coğrafi olarak referanslanmış özellikleri (örneğin bir bölgenin mevsimsel hava durumu veya demografik bilgisi) belirten jeo-uzamsal veriler kullanır (Kamel Boulos, Peng, & VoPham, 2019). GeoAI, karmaşık ve yapılandırılmamış mekânsal verileri girdi olarak işler (Pierdicca & Paolanti, 2022).

Bu veriler, geniş bir yelpazeden gelmektedir:

- **Uzaktan Algılama Verileri:** Uydu görüntüleri, hava görüntüleri, drone'lar (İHA), çok zamanlı veri küpleri ve 3B lazer tarayıcılar (LiDAR) gibi donanımlar aracılığıyla elde edilen veriler GeoAI'nın temelini oluşturur (Pierdicca & Paolanti, 2022; Uluğtekin et al., 2021).

• **Konum Tabanlı Sensör Verileri:** Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları tarafından oluşturulan ve çevresel koşullar, altyapı performansı veya insan faaliyetleriyle ilgili büyük miktarda mekânsal veri akışını içerir (Smolarczyk, 2025).

• **Diğer Veri Türleri:** Nokta bulutları, gözetim videoları, yapılandırılmamış metin verileri ve sosyal medyadan elde edilen coğrafi etiketli veriler GeoAI sistemlerine girdi olarak dâhil edilir (Esri, 2025b).

Geospatial veriler; konumun (boylam ve enlem) yanı sıra nokta, çoklu çizgi, alan ve ızgara gibi çeşitli uzamsal türler aracılığıyla mekânsal bilgileri doğru bir şekilde tanımlayabilir (Fauzi, 2024).

2.3. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları

GeoAI, Büyük Veri'den anlamlı içgörüler çıkarmak için Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) tekniklerini kullanır.

• **Makine Öğrenimi (ML):** GeoAI'nın temel direğidir ve algoritmaları mekânsal verileri analiz edip yorumlar (Smolarczyk, 2025). ML, bilgisayarların ham verideki gizli kalıplardan yinelemeli olarak bilgi edinmesini sağlayan yöntemler ve algoritmalar içerir (Kamel Boulos et al., 2019). Bu sayede GeoAI, kümeleri tespit etme, değişimi hesaplama, kalıpları bulma ve sonuçları tahmin etme yeteneği kazanır (Esri, 2025a; Esri, 2025b).

• **Derin Öğrenme (DL):** Karmaşık ve yapılandırılmamış jeomekânsal verilerin, özellikle uydu ve hava görüntüleri gibi, analizinde üstünlük sağlar (Li, 2021; Smolarczyk, 2025). DL modelleri, doğru tahminlerin yapılabilmesi için verilerden öne çıkan özellikleri (örneğin binalar veya yollar) otomatik olarak çıkarma yeteneğine sahiptir (Li, 2020). Bu yetenek, geleneksel mekânsal analitik yaklaşımlara göre daha otomatik ve akıllı bir detay çıkarma yöntemi sunar (Li, 2020).

• **Bilgisayarlı Görü (CV):** Uydu ve hava görüntüleri gibi görsel mekânsal verilerin yorumlanmasını ve analizini sağlar. CV, görüntüdeki özellikleri, arazi örtüsü tiplerini ve altyapıyı tanımlama ve sınıflandırma uygulamalarına olanak tanır (Smolarczyk, 2025).

2.4. Bulut bilişim ve büyük veri analitiği

GeoAI, yüksek hızda ve büyük hacimlerde veri işleme ihtiyacı nedeniyle Büyük Veri analitiği ve yüksek performanslı hesaplamaların kesişim noktasında yer alır (Li, 2020; Li & Hsu, 2022).

• **Altyapı:** Bulut bilişim, GeoAI'nın büyük miktardaki mekânsal veriyi etkin bir şekilde ele alması için gereken altyapıyı ve ölçeklenebilir işlem ve depolama yeteneklerini sağlar (Smolarczyk, 2025).

• **Gezegensel Ölçekli Analiz:** Google'ın bulut altyapısıyla desteklenen Google Earth Engine (GEE) gibi platformlar, petabaytlarca uydu görüntüsü ve jeo-uzamsal veri kataloğu üzerinde gezegensel ölçekte analiz yeteneği sunar (Google Earth Engine, 2025).

GeoAI'nin amacı: Coğrafi süreçlerin öğrenilmesi, tahmin edilmesi ve modellenmesidir.

GeoAI'nın temel amacı, coğrafi olgular ve süreçler hakkında insan algılama, mekânsal muhakeme ve bilgi keşfi süreçlerini taklit eden akıllı bilgisayar programları geliştirmektir (Gao, 2021; Song, 2020; Li, 2020).

• **Öğrenme ve Akıl Yürütme:** GeoAI, coğrafi olgular ve dinamikler hakkında dinamik algılama, akıllı akıl yürütme ve bilgi keşfini iyileştirmeyi amaçlar (Song, 2020). Makine Öğrenimi, bilgisayarların ham verideki gizli kalıplardan yinelemeli olarak bilgi edinmesini sağlar (Kamel Boulos et al., 2019).

• **Tahmin ve Modelleme:** GeoAI, mekânsal algoritmalarla kümeleri tespit etme ve sonuçları tahmin etme yeteneği sunarak tahmin tabanlı analizler gerçekleştirir (Esri, 2025b). Bu öngörü yeteneği, GeoAI'yı sadece bir analiz aracı olmaktan öteye taşıyarak, kurumsal dirençliliği ve öngörüye dayalı modelleme yeteneğini artıran stratejik bir yetkinlik haline getirir (Esri, 2025c).

Klasik CBS ile farkı: CBS mekânsal analiz yapar, GeoAI öğrenen ve tahmin eden sistemler oluşturur.

GeoAI, geleneksel CBS'nin yeteneklerinin ötesine geçerek, veri yoğun Coğrafi Bilgi Bilimi (GIScience) için yeni bir mekânsal analitik çerçeve olarak işlev görür (Li, 2020).

Tablo 1. Klasik Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI) Yaklaşımlarının Karşılaştırılması

Özellik	Klasik CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi)	Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI)
Temel İşlevi	Coğrafi verilerin toplanması, depolanması, yönetimi ve mekânsal analizi fonksiyonlarını yerine getiren donanım, yazılım ve personel bütünüdür.	YZ yöntemlerini kullanarak, veriden bilgi (knowledge) çıkarma, öğrenme ve tahmin etme yeteneğine sahip sistemler oluşturur (Li, 2020).
Veri Yoğunluğu	Geleneksel yaklaşımlar, gezegensel ölçekte toplanan mekânsal büyük verinin hacmi, hızı ve karmaşıklığı karşısında yetersiz kalmaya başlamıştır (Uluğtekin et al., 2021).	Büyük mekânsal verilerin (petabayt ölçeğinde) ölçeklenebilir işlenmesi ve akıllı analizini gerçekleştirir (Li & Hsu, 2022).
Analiz Yöntemi	Geleneksel olarak, haritalama için mekânsal istatistiksel çıkarım teorisine dayalı mekânsal analiz kullanılmıştır (Song et al., 2023).	Analitik kuralları açıkça programlamaya gerek kalmadan, çok büyük miktardaki veriden tahmin yapmayı öğrenme yeteneği sunar (Li, 2020).
Katma Değer	Statik analiz sonuçları ve haritalar üretir.	Otomasyon ve verimlilik artışı sağlar. Ulusal harita kurumları, CBS'lerini aylar veya günler yerine saatler içinde güncelleyebilir (Esri, 2025a).

GeoAI, basit mekânsal analiz yapmak yerine, akıllı akıl yürütme ve öğrenme yeteneği kazanarak mekânsal bilimlerin problem çözme yeteneğini kökten hızlandırmıştır (Li, 2020)

3. GeoAI'nin KULLANIM ALANLARI

Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI), Yapay Zekâ (YZ) yöntemlerini mekânsal bilimle birleştirerek elde ettiği ölçeklenebilirlik ve yüksek hızda analiz yeteneklerini, kritik küresel zorlukları ele alma hedefiyle birçok sektörde kullanmaktadır (Boutayeb, Cherif, & Khadimi, 2024; Esri, 2025b; Li, 2021). GeoAI'nin temel amacı, Büyük Mekânsal Veri'yi (Big Geodata) analiz ederek dünyanın artan kentsel nüfusunun yaşam kalitesini iyileştirmektir (Fauzi, 2024).

Bu bölümde, GeoAI'nin farklı sektörlerdeki uygulama alanlarına genel bir bakış sunulmaktadır. GeoAI, başta hassas tarım, çevre izleme, afet yönetimi

ve kentsel planlama gibi alanlarda olmak üzere çeşitli ilgi çekici uygulama alanlarında ilerleme kaydetmektedir (Boutayeb et al., 2024; Kamel Boulos, Peng, & VoPham, 2019; Uluğtekin, Başaraner, Güney, & Doğru, 2021).

3.1. Şehir planlama ve ulaşım: Arazi kullanım değişimi, trafik yoğunluğu tahmini, kentsel büyüme analizi

GeoAI, kentsel coğrafya alanında mekânsal olarak açık YZ uygulamalarının ilk aşamasında yer almakta olup, akıllı şehir uygulamaları ve kentsel planlama için benzersiz çözümler sunmaktadır (Liu & Biljecki, 2022).

• **Kentsel Gelişimin ve Arazi Kullanım Değişiminin Modellemesi:** GeoAI, devlet yetkililerinin kentsel gelişimin etkilerini modellemesine olanak tanır ve kaynakların nüfus için kullanılabilirliğini anlamalarına yardımcı olur (Esri, 2025a; Esri, 2025b). GeoAI, görüntü, video ve nokta bulutu verilerinden otomatik bilgi çıkarma ve sınıflandırma yeteneği sayesinde (Esri, 2025b; Smolarczyk, 2025), arazi kullanım değişikliğini (örneğin yeni binaların inşası gibi) hızlıca belirleyebilir ve proaktif eylemler gerçekleştirebilir (Esri, 2025a; Esri, 2025b).

• **Altyapı Yönetimi ve Trafik:** Akıllı şehirlerde GeoAI, trafik örüntülerini, hava kalitesini ve altyapı sağlığını sürekli izleyerek kaynak tahsisini optimize etmekte ve kamu güvenliğini artırmaktadır (Smolarczyk, 2025; Esri, 2025a; Esri, 2025b),,. GeoAI, ayrıca yol ve altyapı bozulmalarını tahmin etmek ve kentsel ulaşım sistemlerinin sürekli izlenmesi için veri odaklı politika oluşturma araçları sunmak üzere Mobilite YZ (Mobility AI) sistemleri tarafından kullanılmaktadır (Esri, 2025a; Esri, 2025b; Coğrafi Yapay Zeka, 2025).

• **İnşaat Sektöründe Kullanım (AEC):** GeoAI, görüntülerden bilgi çıkarma yeteneği ile Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) endüstrisini dönüştürmektedir (Esri, 2025a; Esri, 2025b),. Çıkarılan bu veriler, karar vericilerin proje yönetimini iyileştirmesine, potansiyel riskleri belirlemesine ve bina performansını optimize etmesine olanak tanıyan dijital ikizleri besler (Esri, 2025a; Esri, 2025b).

3.2. Afet yönetimi: Sel, yangın, deprem gibi afetlerin mekânsal risk modellemesi ve erken uyarı sistemleri

GeoAI, doğal afetlere karşı dirençliliğin artırılması ve krizlere müdahale sürelerinin kısaltılması açısından kritik bir rol üstlenir (Boutayeb et al., 2024; Esri, 2025c),.

• **Mekânsal Risk Modellemesi:** GeoAI, hava görüntüleri kullanılarak Grenada'daki binaların ve yolların çıkarılması gibi uygulamalarla, toprak kaymaları için risk altındaki nüfusu ve altyapıyı tespit etmek gibi tahmine dayalı modelleme uygulamalarını destekler (Esri, 2025a; Esri, 2025b),. GeoAI, afetlerle ilgili konum açıklaması çıkarımı için coğrafi bilgi güdümlü büyük dil modellerinin (LLM) kullanımını da içermektedir (GeoAI@UB, 2025),.

• **Erken Uyarı ve Müdahale:** GeoAI, acil durum müdahale sürelerini kısaltmak ve kamu güvenliğini artırmak amacıyla kullanılır (Esri, 2025a; Esri, 2025b),. Hasarlı altyapı ve gezilebilir yollar, GeoAI kullanılarak hızlı bir şekilde belirlenebilir ve bu da ilk müdahale ekiplerinin doğru tahsis edilmesine yardımcı olur (Esri, 2025a; Esri, 2025b). GeoAI, doğal afetlerin tahmin edilmesinde ve izlenmesinde, durumsal farkındalık süresini hızlandırarak proaktif kararlar almayı mümkün kılar (Esri, 2025c).

3.3. Çevre yönetimi: Orman tahribatı, su kaynaklarının izlenmesi, karbon depolama potansiyeli

GeoAI, doğal kaynak yönetimini ve çevresel izlemeyi optimize ederek sürdürülebilir bir geleceğin yaratılmasına katkıda bulunur (Esri, 2025c; Sahana et al., 2022).

• **Doğal Kaynak İzleme ve Orman Yönetimi:** GeoAI, istilacı türlerin otomatik olarak tespit edilmesine yardımcı olarak hassas tarım pazarında devrim yaratmaktadır (Esri, 2025a; Esri, 2025b). Ayrıca, ormancılar ve arazi sahipleri, zaman alıcı yerinde incelemelere gerek kalmadan ağaçların hacimleri ve türleri hakkında bilgi edinmek için GeoAI'yı kullanmaktadırlar (Esri, 2025a; Esri, 2025b).

• **Kirlilik ve Çevresel Maruziyet Modellemesi:** GeoAI, çevresel epidemiyoloji alanında, hava kirliliği maruziyet modellemesini (örneğin PM2.5) iyileştirmek için kullanılmaktadır (VoPham, Hart, Laden, & Chiang, 2018). Çevresel izleme kapsamında, GeoAI; uydu, hava ve trafik verilerini birleştirerek 500 metrelik küresel çözünürlükte anlık hava kalitesi tahminleri

sunmaktadır. GeoAI ayrıca, yerleşik çevrenin özelliklerini (örneğin kentsel yeşil alan) dâhil ederek çevresel maruziyetlerin doğru modellenmesini yapmak için de kullanılmıştır (Kamel Boulos et al., 2019).

3.4. Sağlık coğrafyası: Hastalık yayılımı ve mekânsal epidemiolojik analizler

Konum hem popülasyon hem de bireysel sağlık için ayrılmaz bir parça olduğundan, GeoAI'nın sağlık ve tıbbi bakım alanında yükselen bir rolü vardır (Kamel Boulos et al., 2019; Sahana et al., 2022).

- **Hastalık Yayılımı ve İzleme:** GeoAI, hastalıkların mekânsal dağılımını tanımlamak ve analiz etmek ve hastalık sonuçları üzerindeki konum tabanlı faktörlerin etkisini incelemek için kullanılmaktadır (Kamel Boulos et al., 2019; Sahana et al., 2022). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) bile, 2014 Ebola virüsü salgını gibi küresel uygulamalar için hastalık vakalarının zaman içinde izlenmesi amacıyla coğrafi mekânsal haritalama araçları kullanmıştır (Kamel Boulos et al., 2019).

- **Epidemiyolojik ve Tahmine Dayalı Analizler:** GeoAI, çevresel sağlık, genetik ve bulaşıcı hastalıklar dâhil olmak üzere halk sağlığı disiplinlerinde uygulanabilmektedir (Kamel Boulos et al., 2019). YZ algoritmaları, halk sağlığı için yüksek risk altındaki popülasyonları belirlemek üzere tahmine dayalı modellemeyi destekler (Kamel Boulos et al., 2019).

- **Akıllı Sağlıklı Şehirler ve Hassas Tıp:** GeoAI, konumun (mHealth verileri ve çevresel maruziyet bilgileri) genetik ve yaşam tarzı değişkenleriyle birleştiği hassas tıp (precision medicine) uygulamaları için fırsatlar sunmaktadır (Kamel Boulos et al., 2019; Johnson et al., 2021; Sahana et al., 2022). GeoAI, Nesnelerin İnterneti (IoT) destekli akıllı sağlıklı şehirlerin vizyonunu gerçekleştirmeye katkıda bulunur (Kamel Boulos et al., 2019; Smolareczyk, 2025).

3.5. Enerji sektörü: Yenilenebilir enerji kaynaklarının mekânsal planlaması

GeoAI, kaynak yönetimi optimizasyonu ve varlık denetimi yetenekleri sayesinde enerji sektöründe stratejik bir değer yaratmaktadır.

- **Mekânsal Planlama ve Altyapı:** Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi, petrol ve doğal gaz, elektrik, su gibi altyapı bileşenlerinin yönetimi

ve planlanması için yaygın olarak kullanılmaktadır. GeoAI'nın analitik yetenekleri, geleneksel CBS'nin kullanıldığı Güneş Enerjisi Santrali (GES) yapım yerlerinin CBS tabanlı çok kriterli karar analizi ile belirlenmesi gibi süreçleri desteklemektedir.

- **Varlık İzleme:** GeoAI, petrol ve gaz endüstrisinin, yeni kuyu pedlerinin veya saha erişim yollarının otomatik olarak çıkarılmasıyla varlıklarını izlemesine yardımcı olmaktadır (Esri, 2025a; Esri, 2025b). Bu otomasyon, varlık denetimini kolaylaştırmaktadır (Esri, 2025b).

4. TARIM SEKTÖRÜNDE GeoAI'nin KULLANIM POTANSİYELİ

Coğrafi Yapay Zekâ'nın (GeoAI) tarımsal faaliyetlere entegrasyonu hem verimlilik hem de sürdürülebilirlik açısından muazzam fırsatlar sunmaktadır (Boutayeb, Cherif, & Khadimi, 2024; Esri, 2025c; Uluğtekin, Başaraner, Güney, & Doğru, 2021). Akıllı tarım teknolojileri çerçevesinde yapay zekâ (YZ) ve büyük verinin (Big Data) kullanımı, tarımsal girdilerin yönetimine ilişkin veriye dayalı yönetim stratejileri sağlayarak, ekonomik ve çevresel yönden etkin bir tarım yapılmasına olanak tanımaktadır (Türker, 2024b). GeoAI, coğrafi verileri bilim ve teknoloji ile birleştirerek çevresel etkiler ve operasyonel riskler hakkındaki gerçek dünya anlayışını hızlandırmaktadır (Esri, 2025c).

4.1. Hassas Tarım Uygulamaları

Hassas Tarım (HT), GeoAI'nın temel uygulama alanıdır ve tarımsal girdileri ihtiyaçlarla tam olarak eşleştirmek için ileri teknolojilerin kullanılmasını ifade eden daha yerleşik bir kavram için yeni bir yön sunmaktadır (Türker, 2024b; Uluğtekin et al., 2021).

- Uydu görüntüleri, drone verileri ve sensör verilerinin yapay zekâ ile bütünleştirilmesi GeoAI, uydu ve hava görüntüleri, drone (İHA) verileri, nokta bulutları, gözetim videoları ve Nesnelerin İnterneti (IoT) sensörleri gibi geniş bir yelpazedeki karmaşık ve yapılandırılmamış mekânsal verileri girdi olarak işler (Esri, 2025b; Pierdicca & Paolanti, 2022; Uluğtekin et al., 2021). Akıllı tarım, IoT bileşenlerinden (algılama cihazları) gelen veri akışlarını senkronize eden, veri odaklı kararları ve verimli kaynak yönetimini mümkün kılan Çiftlik Yönetim Bilgi Sistemlerini (ÇYBS) içerir (Türker, 2024b). GeoAI'nın temel

teknolojileri arasında, çevresel koşullar ve insan faaliyetleri hakkında büyük miktarda mekânsal veri üreten IoT cihazları bulunmaktadır (Smolarczyk, 2025). Ayrıca, düşük maliyetli ışık sensörlerinin (örneğin BH1750, TSL2561) kalibrasyon ve ölçüm sonuçlarına göre, tarımsal uygulamalarda ışık rejimini izlemek için başarılı bir şekilde kullanılabilceği gösterilmiştir (Beyaz & Gül, 2022).

- Bitki hastalıklarının erken tespiti GeoAI, yapay zekâ algoritmaları ve görüntü işleme teknolojileri sayesinde, zararlıların ve hastalıkların ortaya çıkmasından önce hasatalıkların tahmin edilmesi için kullanılabilir (Türker, 2017). Yüksek çözünürlüklü uydu ve drone tabanlı görüntüleme sistemleri, tarım arazilerini izleyerek hastalık, zararlı veya su eksikliği gibi sorunları önceden tespit etme olanağı sağlar (Türker, 2024b). GeoAI, hassas tarım pazarında devrim yaratarak istilacı türlerin otomatik olarak tespit edilmesine yardımcı olmaktadır (Esri, 2025a; Esri, 2025b; Esri, 2025c).

- Ürün verimi tahmini GeoAI algoritmaları, büyük veri setlerini analiz ederek ileriye dönük tahminlerde bulunma imkânı sağlar (Türker, 2024b). GeoAI, mekânsal algoritmalarla kümeleri tespit ederek, kalıpları bularak ve sonuçları tahmin ederek tahmine dayalı analizler gerçekleştirebilir (Esri, 2025b). Örneğin, elma ağaçlarında toplam rekolte tahminini yapmak için Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi YZ ve görüntü işleme teknikleri kullanılmış ve %85'in üzerinde doğruluk oranları elde edilmiştir (Ataç & Kayabaşı, 2023). Ayrıca, sığır yüzü tanıma konusunda yapılan çalışmalarda, veri artırma ve transfer öğrenimi kullanılarak DenseNet201 algoritması ile %99.53 gibi yüksek doğruluk elde edilmiş, bu da geleneksel kulak küpesi tabanlı sistemlere alternatif oluşturmuştur (Polat, Koc, Ertugrul, Koc, & Ekinci, 2025).

- Toprak nemi ve besin düzeyi haritalaması GeoAI, kaynak yönetimini optimize etme yeteneği sunar (Esri, 2025c). Hassas tarım (HT) sistemleri, toprak, mahsul ve mikro iklim gibi mahsul ortamında mevcut olanları izlemek ve haritalamak için Gerçek Zamanlı Konum Sistemlerini ve sensör tabanlı haritalamayı kullanır (Türker, 2024b). Bu sistemler, toprak nem seviyelerini ve mahsulün su gereksinimlerini gerçek zamanlı olarak izleyerek sulama ve gübreleme işlemlerini optimize etmeye yardımcı olmaktadır (Türker, 2024b).

4.2. İklim Duyarlı Tarım

GeoAI, kurumsal dirençliliği artırma ve iş kararlarının çevresel etkilerini anlama yeteneği (Esri, 2025b) sayesinde iklim değişikliğine uyum ve risk azaltma konularında stratejik bir rol oynamaktadır.

- Kuraklık, sel, don gibi iklim risklerinin mekânsal modellemesi GeoAI, iş fırsatlarının, çevresel etkilerin ve operasyonel risklerin gerçek dünyada anlaşılmasını hızlandırmak için tasarlanmıştır (Esri, 2025c). Küresel ısınma ve ani hava durumu değişikliklerinin tarımı olumsuz etkilediği bir ortamda (Türker, 2024b), iklim değişikliğinin tarımsal üretim düzeylerini etkilemeye devam edeceği ve göz ardı edilemeyecek riskler ortaya çıkaracağı öngörülmektedir (Degirmencioglu et al., 2019).

- GeoAI temelli erken uyarı sistemleri GeoAI, sensörler ve video gibi kaynaklardan olayları izleyip analiz ederek hızlı tepki süreleri ve proaktif kararlar alınmasını sağlar (Esri, 2025c). Bu, afet yönetimi için durumsal farkındalık süresini hızlandırmaktadır (Esri, 2025c).

- İklim değişikliğine dayanıklı üretim planlaması GeoAI, kaynak kullanımını optimize ederek ve atıkları azaltarak sürdürülebilir bir geleceğin yaratılmasına katkıda bulunur (Esri, 2025c). İklim değişikliği ve su kıtlığının kaçınılmaz olduğu senaryolarda, mevcut sürdürülebilirlik seviyesini korumak için kuraklığa dayanıklı çeşitlerin seçimi ve damla sulama gibi yeni tarım uygulamalarının ciddiyetle dikkate alınması ve benimsenmesi gerekmektedir (Degirmencioglu et al., 2019; Ertuğrul, Özgünaltay Ertuğrul, & Değirmencioglu, 2022). Ayrıca, iklim değişikliği, yem bitkileri tarımında toprak koşullarına daha toleranslı ve suya daha az ihtiyaç duyan bitkilerin üretim döngüsündeki yerinin artırılmasını zorunlu kılmaktadır (Kırkpınar & Açıkgöz, 2022). Su-Enerji-Gıda Bağlantısı (WEF Nexus), bu kaynakların sürdürülebilir bir şekilde tahsis edilmesine yönelik stratejileri belirlemek için modelleme araçları sunar (Degirmencioglu et al., 2019).

4.3. Kaynak Yönetimi ve Verimlilik

GeoAI'nın sağladığı otomasyon, manuel iş akışlarını kolaylaştırarak verimliliği artırmakta ve maliyetleri düşürmektedir (Esri, 2025c; Smolarczyk, 2025). Bu yetenek, tarımsal kaynak yönetiminde belirgin avantajlar yaratır.

- Su ve gübre kullanımının optimize edilmesi Akıllı tarım, 4D kuralıyla (doğru kaynak, doğru zamanda, doğru yerde, doğru oranda) tarımsal girdilerin

hassasiyetle uygulanmasına olanak tanır (Türker, 2024b; Türker, 2017). Bu yaklaşım, su ve gübre gibi girdilerde önemli tasarruflar sağlamakta, maliyetleri düşürmekte ve verimi artırmaktadır (Türker, 2024b). Hassas tarım uygulamalarının, su tüketiminde %50'ye varan azalma sağlayabileceği belirtilmektedir (Türker, 2017). Değişken Oran Teknolojileri (DOT), bireysel mahsul ihtiyaçlarına uygun olarak gübre ve suyun özelleştirilmiş dağıtımını mümkün kılar ve çevresel ayak izini azaltma potansiyeli taşır (Türker, 2024b).

- Sulama haritalarının oluşturulması Akıllı sulama yönetimi, sensörler ve otomatik kontrol sistemleriyle birlikte karar destek yazılımları kullanılarak sulama işlemlerini etkin bir şekilde yönetmekte ve kullanılan su miktarını optimize etmektedir (Türker, 2024b). Bu sistemler, sulama zamanı, aralıkları ve verilecek optimum su miktarları ile verim artışının elde edilmesini sağlar, sulama haritalarının oluşturulması ve uygulanması için gerekli veriye dayalı yönetimi destekler (Türker, 2024b; Türker, 2017).

- Pestisit uygulama alanlarının mekânsal analizi GeoAI, zararlıların haritalanması için kritik öneme sahiptir. Pestisit ve kimyasal ilaçların mahsullerin özel ihtiyaçlarına göre hassasiyetle uygulanmasına olanak sağlanarak (Türker, 2024b; Türker, 2017), girdilerin etkinliği en üst düzeye çıkarılmakta ve maliyetler düşürülmektedir (Türker, 2017). İlaçlamada %90'lara varan tasarruflar elde edilebileceği belirtilmektedir (Türker, 2017). GeoAI, otomatik istilacı tür tespiti ile pestisit uygulama alanlarının belirlenmesinde hassas çözümler sunar (Esri, 2025a; Esri, 2025b).

4.4. Karar Destek Sistemleri

YZ algoritmaları, büyük veri setlerini analiz ederek çiftçilere geleceğe yönelik karar desteği sağlama, ileriye dönük tahminlerde bulunma ve riskleri önceden görme imkanı vermektedir (Türker, 2024b),.

- GeoAI tabanlı mekânsal karar destek sistemlerinin geliştirilmesi GeoAI, karmaşık mekânsal problemlere çözüm sunmak için YZ, büyük mekânsal veri ve yüksek performanslı hesaplamanın kesişim noktasında yer alır (Li, 2020),. GeoAI, konum zekâsını karar verme sürecine ekleyerek gerçek dünya verilerinden odaklı kararlar alınmasını sağlar (Esri, 2025c),. GeoAI, sadece bir analiz aracı olmaktan öte, kurumsal dirençliliği ve öngörüye dayalı modelleme yeteneğini artıran stratejik bir yetkinlik haline gelmiştir (COĞRAFİ YAPAY ZEKA, 2025),. Bu sistemler, CBS yazılımları kullanılarak hassas

çiftlik planları, arazi ve verim haritaları oluşturmak için temel oluşturur (Türker, 2024b; Vikipedi, 2024),. Mekânsal karar destek sistemlerinin (SDSS) geliştirilmesi, otomatik makine öğrenimi (AutoML) gibi gelişmiş analitik yöntemlerle hızlanmaktadır (Wen & Li, 2023),.

• Çiftçilere yönelik tahmine dayalı dijital danışmanlık sistemleri YZ, çiftçilerin düzenli olarak yapmaları gereken karmaşık kararları kopyalayamasa da, bu kararları kolaylaştırmak için çok iyi bir şekilde kullanılabilir (Türker, 2017),. YZ, büyük veri havuzunu kısa sürede analiz etme ve en iyi hareket tarzını önerme yeteneği ile belirleyici olacaktır (Türker, 2017),. Bu durum, ürünler için en uygun hasat zamanının tahmin edilmesi, hastalıkların önceden tespiti ve hasattan önce verim rekolte tahminleri sunabilecek dijital danışmanlık sistemlerini mümkün kılmaktadır (Türker, 2017),

5. TÜRKİYE BAĞLAMINDA GeoAI VE TARIM

Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI), mekânsal bilişim, Yapay Zekâ (YZ) ve büyük verinin stratejik kesişimi olarak, tarım sektöründe verimliliği ve sürdürülebilirliği artırma konusunda büyük bir potansiyel barındırmaktadır (Boutayeb, Cherif, & Khadimi, 2024; Uluğtekin, Başaraner, Güney, & Doğru, 2021). Küresel ölçekte yıllık bileşik büyüme oranının (CAGR) %30 düzeyinde olması beklenen GeoAI uygulamalarına öncelik verilmesi, Türkiye’de mekânsal bilgi sektörlerinin daha büyük katma değer üretmesi ve işsizlik sorununu çözebilmesinin tek yolu olarak görülmektedir (Guney, 2020). Bu durum, GeoAI'nın Türkiye tarımı için stratejik bir teknoloji olduğunu göstermektedir.

5.1. Türkiye’de CBS ve uzaktan algılama alanında mevcut altyapı

Türkiye’de Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi, uzun yıllardır haritacılık, kentsel planlama, kaynak yönetimi, bilimsel araştırmalar ve tarım dâhil olmak üzere geniş bir yelpazede etkin olarak kullanılmaktadır (Vikipedi, 2024).

CBS, özellikle tarımsal uygulamalarda geleneksel olarak ekili tarım alanlarının tespiti, toplam mahsulün hesaplanması ve tarımsal ürünler için en uygun yerlerin belirlenmesi gibi işlevler sunmaktadır (Vikipedi, 2024). Tarımda mekânsal bilişim kullanımı, bölgesel düzeyde de mevcuttur; örneğin, Kırşehir ilinin Tarımsal Mekanizasyon Düzeyi, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

kullanılarak belirlenmiştir (Özgünaltay-Ertuğrul, Ertuğrul, & Degirmencioglu, 2019).

Ancak, kaynaklar genel olarak Türkiye Mekânsal Bilgi Endüstrisi'nin mevcut durumuna dair net ve ölçülebilir verilere erişimin kısıtlı olduğunu belirtmektedir:

- Türkiye'deki Mekânsal Bilgi Endüstrisi'nin ekonomik büyüklüğü, yıllık büyüme oranı (CAGR), Gayri Safi Yurt İçi Hasıla'ya (GSYİH) katkısı ve dış ticarete olan katkısı bilinmemektedir (Guney, 2020).

- Türkiye'nin uzaya gönderdiği uzaktan algılama uyduları Göktürk-1 ve Göktürk-2'nin verimlilik ve üretkenlik açısından Türkiye Mekânsal Bilgi Endüstrisi'ne katkıları da bilinmemektedir (Guney, 2020).

Bu veri ve literatür eksikliği, mevcut CBS ve uzaktan algılama altyapısının verimliliğinin ve ekonomik etkisinin somut olarak ölçülememesi sorununu ortaya koymaktadır (Guney, 2020).

5.2. GeoAI farkındalığının ve uygulama örneklerinin sınırlı olması

Küresel GeoAI pazarının yüksek büyüme hızına rağmen, Türkiye'de bu alandaki farkındalık ve uygulama örneklerinin yaygınlığı konusunda önemli kısıtlamalar mevcuttur. Eğer bir endüstrinin büyüklüğü ve büyüme hızı ölçülemezse, o endüstrinin geleceği için stratejiler belirlenemez ve planlama yapılamaz (Guney, 2020).

Mevcut çalışmalarda GeoAI tekniklerinin tarım alanındaki yüksek potansiyeli gösterilmiştir:

- Hayvancılık Uygulamaları: Derin öğrenme (DL) tabanlı yöntemler, büyükbaş hayvan yüz tanıma (örneğin Bursa'daki bir çiftlikten toplanan verilerle) gibi uygulamalarda %99.53 gibi yüksek doğruluk oranları elde ederek, geleneksel kulak küpesi tabanlı sistemlere alternatif oluşturmuştur (Polat, Koc, Ertugrul, Koc, & Ekinci, 2025). Bu tür akıllı sistemlerin, gelecekte çok sayıda takılabilir sensöre ve fiziksel etikete olan ihtiyacı ortadan kaldıracabileceği öngörülmektedir (Polat et al., 2025).

- Bitkisel Üretim Uygulamaları: Görüntü işlemeye dayalı YZ teknikleri kullanılarak Karaman'daki elma ağaçlarında yapılan rekolte tahmin çalışmalarında %85'in üzerinde doğruluk oranları elde edilmiştir (Ataç & Kayabaşı, 2023). Bu tür tahmin sistemleri, tarımsal üretimdeki yüksek risk ve

belirsizliğe daha hızlı ve tutarlı çözümler sunmaktadır (Ataç & Kayabaşı, 2023).

Bu öncü uygulamalar mevcut olsa da GeoAI'nın geniş çaplı entegrasyonu ve GeoAI uygulamalarına stratejik öncelik verilmesi gerekliliği, alandaki farkındalığın artırılması gerektiğini göstermektedir (Güney, 2020).

5.3. Tarımsal veri paylaşımı, erişim ve standardizasyon sorunları

GeoAI sistemleri, Makine Öğrenimi (ML) ve Derin Öğrenme (DL) algoritmalarını eğitmek ve büyük mekânsal verilerden anlamlı bilgiler çıkarmak için yüksek kaliteli, etiketlenmiş veri setlerine kritik ölçüde ihtiyaç duyar (Li, 2020; Özyaydın et al., 2024). GeoAI'nın başarısı, model mimarisinden ziyade büyük ölçüde girdi verisinin kalitesine bağlıdır.

Ancak Türkiye'de tarım sektöründe GeoAI uygulamalarının önündeki temel zorluklar, veri kaynaklıdır:

- **Veri Kıtlığı ve Kalitesi:** Uzaktan algılama verilerinden otomatik bina çıkarımı gibi uygulamalar için bile, kaliteli etiketlerin olduğu veri setleri büyük önem taşımaktadır ve bu tür veri setlerinin oluşturulması GeoAI uygulamalarındaki en büyük darboğaz olarak kabul edilmektedir (Özyaydın et al., 2024). Tarımsal alanda, özellikle uydu görüntüleri, İHA ve IoT sensörlerinden elde edilen büyük mekânsal veri akışına bağımlılık göz önüne alındığında, eğitim verilerindeki tutarsızlıklar, yanlışlıklar ve önyargılar (biases) GeoAI'nın karşılaştığı genel teknik zorluklardır.

- **Mekânsal Heterojenlik (Non-Stationarity):** Farklı coğrafi bölgelerdeki yapısal ve geometrik özelliklerin çeşitliliği, bir bölgede eğitilen GeoAI modelinin başka bir bölgede düşük performans göstermesine yol açan temel metodolojik zorluktur (Özyaydın et al., 2024). Türkiye'nin geniş coğrafi çeşitliliği (farklı iklim, toprak ve ürün koşulları), tarımsal uygulamalarda veri tutarlılığı ve standardizasyon sorununu daha da belirgin hale getirmektedir.

- **Veri Paylaşımı ve Yönetimi:** Akıllı tarımın etkin yönetimi, IoT bileşenlerinden ve sensörlerden gelen veri akışlarını senkronize eden Çiftlik Yönetim Bilgi Sistemlerini (ÇYBS) gerektirir (Türker, 2024b). Ancak Türkiye'deki tarımsal bilgi sistemleri ve veri paylaşım altyapılarının bu karmaşık veri akışını yönetme ve standardize etme konusundaki eksiklikleri, GeoAI'nın ölçeklenebilirliğini sınırlamaktadır.

5.4. Araştırma ve eğitim açısından geliştirilmesi gereken alanlar

GeoAI'nın Türkiye'de tarım da dâhil olmak üzere birçok alanda başarılı bir şekilde uygulanması için disiplinler arası yetkinliklerin geliştirilmesi gerekmektedir:

- **Disiplinler Arası Yetkinlik:** GeoAI, YZ teorisi, programlama/hesaplama pratikleri ve coğrafi alan bilgisini birleştiren multidisipliner bir uzmanlık gerektirir (Gao, 2021). GeoAI projelerinin başarısı için, geleneksel CBS uzmanları, uzaktan algılama uzmanları ve derin öğrenme veri bilimcilerini bir araya getiren ekiplere ihtiyaç vardır (Uluğtekin et al., 2021).

- **Veri Odaklı Yatırım:** GeoAI araştırmalarında yatırımın ana odağı, algoritma geliştirmeden ziyade, modelin genelleştirilebilirliğini sağlamak için bölgesel çeşitliliği temsil eden, yüksek kaliteli, etiketlenmiş mekânsal veri setlerinin oluşturulması ve kürasyonu süreçlerine kaydırılmalıdır (Özaydın et al., 2024).

- **Bölgesel Araştırmaların Artırılması:** Mekânsal bilgi alanındaki güncel eğilimler, mekânsal zekâ, mekânsal bilişim ve coğrafi bilgi bilimi konularını kapsayan akademik araştırmaların artırılmasını gerektirmektedir (Uluğtekin et al., 2021). Türkiye'deki akademik çalışmalar (örneğin Kırşehir'de CBS ve WEF Nexus, Bursa'da hayvan yüz tanıma), GeoAI'nın tarım ve mekanizasyon alanındaki potansiyelini göstermektedir (Özgünaltay-Ertuğrul et al., 2019; Polat et al., 2025). Bu bölgesel odaklı çalışmaların yaygınlaştırılması ve derinleştirilmesi önemlidir.

5.5. Potansiyel pilot bölgeler: Konya Ovası, Çukurova, GAP Bölgesi

Kaynaklarda doğrudan Konya Ovası, Çukurova veya GAP Bölgesi gibi belirli tarımsal bölgelere GeoAI pilot uygulamaları için bir referans bulunmamakla birlikte, Türkiye'deki mekânsal ve çevresel zorlukların çözümlenmesinde bölgesel çalışmaların önemi vurgulanmıştır (Degirmencioglu et al., 2019; Özgünaltay-Ertuğrul et al., 2019).

Bu geniş ve kritik tarım bölgeleri, GeoAI'nın sunduğu gezegensel ölçekte büyük veri analiz yeteneklerini test etmek için ideal alanlar sunmaktadır:

1. Su-Enerji-Gıda Bağlantısı (WEF Nexus) Modellemesi: Özellikle Gediz Havzası'nda yapılan WEF Nexus analizleri, su kıtlığı ve iklim değişikliği etkilerinin tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini tehdit ettiğini göstermiştir (Degirmencioglu et al., 2019). GeoAI, bu üç kaynağın (Su, Enerji, Gıda) birbiriyle olan karmaşık ve dinamik etkileşimini modelleyerek (Ertuğrul, Özgünaltay Ertuğrul, & Degirmencioglu, 2022), Konya Ovası (su kıtlığı riski), GAP Bölgesi (sulama ve enerji entegrasyonu) ve Çukurova (yoğun tarım ve iklim riskleri) gibi bölgelerde sürdürülebilir kaynak tahsisi politikaları için tahmine dayalı kararlar sunabilir.

2. Ölçeklenebilirlik ve Genelleştirilebilirlik Testi: Bu bölgelerin geniş tarım arazileri, GeoAI modellerinin karşılaştığı mekânsal heterojenlik zorluğunu test etmek için mükemmel bir zemin sağlar. Farklı iklim ve toprak koşullarına sahip bu bölgelerde eğitilen hassas tarım modellerinin (örneğin bitki sınıflandırma veya rekolte tahmini modelleri) genelleştirilebilirliği test edilebilir.

3. Teknoloji Entegrasyonu: Bu bölgeler, büyük ölçekli mekânsal veri (uydu, İHA, IoT sensörleri) toplanmasını ve bu verilerin akıllı tarım ve iklime duyarlı tarım uygulamaları (erken hastalık tespiti, değişken oranlı ilaçlama) için kullanıldığı, GeoAI tabanlı Karar Destek Sistemlerinin (KDS) geliştirilmesi için kritik pilot alanlar olabilir (Türker, 2024b).

6. ZORLUKLAR VE GELECEK YÖNELİMLERİ

Coğrafi Yapay Zekâ (GeoAI), mekânsal bilişim ve yapay zekânın (YZ) keşişiminde büyük fırsatlar sunarken, geniş çapta benimsenmesini engelleyen önemli teknik, etik ve politik zorluklarla da karşı karşıyadır (Boutayeb, Cherif, & Khadimi, 2024; Haseeb Saleh, Arrang, & Cardoso, 2025).

6.1. Teknik Zorluklar: Veri Eksikliği, Algoritma Genelleme Sorunu

GeoAI'nın güvenilir ve genelleştirilebilir sonuçlar üretmesini sınırlayan temel zorluklar, verinin doğasından ve algoritmaların işleyişinden kaynaklanmaktadır (Li, 2020),.

- Veri Kıtlığı ve Kalite Sorunları (Data Scarcity): YZ algoritmalarının başarısı, model mimarisinden ziyade girdi verisinin kalitesine bağlıdır. Özellikle denetimli öğrenme (supervised learning) yöntemlerinin yüksek

doğrulukta sonuçlar vermesi için etiketlenmiş, yüksek kaliteli mekânsal veri setlerine ihtiyaç duyulur (Özaydın, Amirgan, Taşkın, & Musaoğlu, 2024; Li, 2020). Bu tür veri setlerinin oluşturulması ve küresasyonu, GeoAI uygulamalarındaki en büyük darboğaz olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, uzaktan algılama verileri (uydu görüntüleri) sıklıkla atmosferik parazit veya bozulmaya maruz kalabilir (Smolarczyk, 2025). Düşük çözünürlüklü verilerin doğruluğu sınırlıyken, yüksek çözünürlüklü veriler yüksek depolama ve hesaplama gücü gerektirir (Pierdicca & Paolanti, 2022; Smolarczyk, 2025). Sınırlı veri olduğunda, YZ modelleri geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük performans gösterebilir (Polat, Koc, Ertugrul, Koc, & Ekinci, 2025).

• **Algoritma Genelleme ve Mekânsal Heterojenlik (Non-Stationarity):** GeoAI'nın karşılaştığı en temel metodolojik sorun, coğrafi verilerin doğasından kaynaklanan mekânsal heterojenlik problemidir (COĞRAFI YAPAY ZEKA, 2025; Li & Hsu, 2022; VoPham et al., 2018). Bu durum, farklı yapısal ve geometrik özelliklere sahip bölgelerde (örneğin kentsel alanlar veya farklı tarım bölgeleri) eğitilen bir modelin başka bir yerde düşük performans göstermesine neden olur (Özaydın et al., 2024; Wu et al., 2024). Bu zorluk, GeoAI model tasarımında mekânsal otokorelasyon ve Tobler'in birinci coğrafya yasası gibi mekânsal ilkelerin göz ardı edilmesinden kaynaklanır ve GeoAI'nın bilimsel olarak derinlemesine entegrasyonunu engeller (Li & Hsu, 2022; Mai, Xie, & Jia, 2025; Wang et al., 2024).

6.2. Etik Zorluklar: Veri Gizliliği, Yapay Zekâ Modellerinin Şeffaflığı

GeoAI'nın konumsal bilginin hassasiyeti ve modellerin karmaşıklığı nedeniyle önemli etik risklerle yönetilmesi gerekmektedir (McKenzie et al., 2023; Haseeb Saleh et al., 2025).

• **Veri Gizliliği (Geoprivacy):** Konum verileri, kimlikle ayrılmaz bir şekilde bağlantılı olduğu için özellikle hassas kabul edilir (McKenzie et al., 2023). Bir kişinin ziyaret ettiği yerler ve zamanlar; gelir, ırk veya eğitim gibi sosyo-demografik özellikleri yüksek doğrulukla çıkarılabilir (McKenzie et al., 2023). GeoAI teknolojileri, birden fazla kaynaktan veri birleştirerek bireyler hakkında şaşırtıcı doğruluk seviyelerinde çıkarımlar yapabilir (McKenzie et al., 2023). Ayrıca, bir kişinin gizliliğinin, komşunun paylaştığı bilgilerden

etkilenmesi (co-location privacy) gibi durumlar, GeoAI ile daha da şiddetlenebilir (McKenzie et al., 2023).

- Yapay Zekâ Modellerinin Şeffaflığı ve Coğrafi Önyargı (Geo-Bias):

- *Şeffaflık/Açıklanabilirlik*: YZ sistemlerine artan bağımlılık, YZ tarafından üretilen çıktılar için sağlam bir yönetim çerçevesini zorunlu kılmaktadır (COĞRAFİ YAPAY ZEKA, 2025; McKenzie et al., 2023). GeoAI modellerinin açıklanabilir YZ (Explainable AI) teknikleri kullanılarak denetlenebilir olması, özellikle hassas tarım ve kamu güvenliği gibi alanlarda kararların güvenilirliği ve etiği açısından kritik öneme sahiptir (Haseeb Saleh et al., 2025; Özüağ & Ertuğrul, 2024).

- *Coğrafi Önyargı (Geo-Bias)*: Geo-bias, bir YZ modelinin farklı coğrafi bölgelerde sistematik olarak farklı performans göstermesi durumudur (Wang et al., 2024; Xie et al., 2022). Eğer GeoAI modelleri, coğrafi olarak temsili olmayan verilerle (örneğin sadece gelişmiş bölgelerden gelen veriler) eğitilirse, kırsal bölgelerdeki yapıları veya koşulları yanlış tespit etme riski oluşur. Bu, kaynakların veya hizmetlerin eşitsiz dağıtımına yol açarak mekânsal adalet eksikliğine neden olur (Wang et al., 2024; Xie et al., 2022). GeoAI'nın sorumlu bir şekilde uygulanması için, geo-bias'ı nicel olarak ölçülebilen ve azaltabilen metodolojilere ihtiyaç vardır (Wang et al., 2024).

6.3. Politik Zorluklar: Açık Veri Politikaları, Dijital Dönüşüm Stratejileri

GeoAI'nın potansiyelini maksimize etmek için yasal ve kurumsal düzenlemeler, özellikle veri erişimi ve yönetim alanlarında hayati önem taşımaktadır.

- *Yönetmelik ve Düzenleme İhtiyacı*: Hükümet düzenlemeleri ve yasaları genellikle teknolojik ilerlemelerin gerisinde kalmaktadır (McKenzie et al., 2023). GeoAI'nın artan kullanımı, verilerin toplanma, depolanma ve analiz edilme biçimlerine ilişkin bağımsız denetim ve uluslararası düzenlemeler ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır (McKenzie et al., 2023). Gizlilik koruma prensiplerinin teknolojinin tasarımına en başından dâhil edilmesi ("Tasarım Gereği Gizlilik") gereklidir (McKenzie et al., 2023).

- *Açık Veri Politikaları ve Şeffaflık*: Açık kaynaklı GeoAI paradigmaları, şeffaflığı, tekrarlanabilirliği ve bilimsel titizliği desteklediği için kamu uygulamalarında önemlidir (Huang et al., 2025; Esri, 2025b). Açık çerçeveler,

araştırmacıların ve politika yapımcıların modellerin nasıl çalıştığını anlamalarına ve çıktıları denetlemelerine olanak tanır (Huang et al., 2025). GeoAI'nın geleceği, kurumsal istikrar için tescilli platformların (örneğin Google Earth AI) gücünü kullanırken, şeffaflık ve bilimsel kesinlik için açık kaynaklı çözümlerin entegre edildiği hibrit bir mimariyi gerektirmektedir.

- Dijital Dönüşüm Stratejileri: Küresel ölçekte GIS hizmetlerinin en büyük müşterisi hükümetlerdir (Guneay, 2020). GeoAI, ulusal haritalama kurumlarının CBS'lerini günler veya aylar yerine saatler içinde güncelleme yeteneği sunarak kamu hizmetlerinde hızlandırılmış mekânsal problem çözme ve verimlilik artışı sağlar (Esri, 2025a; Esri, 2025b). Türkiye'nin küresel büyüme hızına (CAGR %30) ayak uydurması için GeoAI uygulamalarına öncelik verilmesi gerektiği açıkça belirtilmiştir (Guneay, 2020).

6.4. Gelecek Vizyonu: GeoAI ile İklim Dirençli ve Veri Odaklı Tarım Sistemleri

GeoAI'nın gelecekteki yörüngesi, küresel zorlukları ele alabilen akıllı, öngörüye dayalı ve sürdürülebilir sistemlere doğru ilerlemektedir.

- Yeni Nesil GeoAI ve Mekânsal Akıl Yürütme: GeoAI'nın geleceği, sadece görüntü analizinden (DL/CV) anlamsal akıl yürütme yeteneğine sahip sistemlere doğru ilerleyecektir (Mai et al., 2025). Bu, Büyük Dil Modelleri (LLM) ve Vektör Veritabanlarının entegrasyonu ile sağlanacak, GeoAI'yı analitik yetkinlikten bağlamsal zekâya taşıyacaktır.

- İklim Dirençli Tarım Sistemleri: GeoAI, kurumsal dirençliliği artırmanın zorunlu bir yetkinliği olarak konumlanmaktadır. İklim değişikliği nedeniyle artan kuraklık, sel ve don gibi risklerin mekânsal modellemesini yaparak erken uyarı sistemlerini destekler (Esri, 2025c; Degirmencioglu et al., 2019; Ertuğrul et al., 2022). Kuraklığa dayanıklı çeşitlerin seçimi ve damla sulama gibi yeni tarım uygulamalarının benimsenmesi, iklim uyumu açısından GeoAI tarafından sağlanan içgörülerle desteklenecektir (Degirmencioglu et al., 2019).

- Veri Odaklı ve Otomatik Tarım: GeoAI, hassas tarım pazarında devrim yaratarak, istilacı türlerin otomatik olarak tespit edilmesine (Esri, 2025a; Esri, 2025b) ve çiftçilere kaynak yönetimini optimize etme konusunda öngörüler sunmaya devam edecektir (Türker, 2024b; Esri, 2025c). Hayvancılıkta ise GeoAI'nın gelişimi, robotik ve erken teşhis sistemlerinin (hastalık, canlı ağırlık,

östrus) uygulanmasını sağlayarak fiziksel etiketlere ve manuel denetime olan ihtiyacı ortadan kaldırabilir (Polat et al., 2025; Türker, 2024b).

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

GeoAI, mekânsal bilişim, coğrafi bilgi bilimi ve YZ tekniklerini birleştirerek, dünyanın en acil sorunlarına çözüm sunma ve karar verme süreçlerini dönüştürme potansiyeline sahip, hızla gelişen stratejik bir alandır (Haseeb Saleh et al., 2025; Li, 2020; Uluğtekin et al., 2021).

GeoAI, mekânsal zekâ ve yapay öğrenmeyi birleştirerek tarımda dönüşüm yaratma potansiyeline sahiptir.

GeoAI, yapay öğrenme (ML/DL) yeteneklerini coğrafi veri setleriyle (uydu, drone, sensörler) entegre ederek, hassas tarım ve tarımsal kaynak yönetimi alanlarında devrim niteliğinde ilerlemeler kaydetmektedir (Esri, 2025a; Esri, 2025b; Li, 2020). Bu sayede GeoAI, istilacı türlerin otomatik tespiti ve ürün verimi tahmini gibi uygulamalarla verimliliği artırmaktadır (Esri, 2025a; Esri, 2025b). Ayrıca, DL/ML teknikleri, geleneksel sistemlerin zorlandığı yapılandırılmamış jeomekânsal verilerden (görüntüler) otomatik ve akıllı detay çıkarma yeteneği sunar (Li, 2020; Li & Hsu, 2022).

Türkiye’de bu alanın gelişmesi için veri altyapısının güçlendirilmesi, akademik iş birliklerinin artması ve politika desteği gereklidir.

Türkiye’nin küresel GeoAI pazarındaki büyüme hızına (CAGR %30) ulaşabilmesi için stratejik müdahaleler gereklidir (Guney, 2020).

- Veri Altyapısının Güçlendirilmesi: GeoAI'nın en büyük darboğazı, modelin genelleştirilebilirliğini sağlamak için bölgesel çeşitliliği temsil eden, yüksek kaliteli, etiketlenmiş mekânsal veri setlerinin oluşturulmasıdır (Özaydın et al., 2024). Politika yapıcıların, bu veri etiketleme ve küresel süreçlerine yatırım yapmaya öncelik vermesi gerekmektedir.

- Akademik İşbirliklerinin Artırılması: GeoAI projeleri, CBS uzmanlarını, uzaktan algılama uzmanlarını ve derin öğrenme veri bilimcilerini bir araya getiren multidisipliner ekiplerin kurulmasına bağlıdır (Gao, 2021; Uluğtekin et al., 2021). Eğitim ve araştırma alanında, YZ teorisi, hesaplama pratikleri ve coğrafi alan bilgisini birleştiren programlar geliştirilmelidir (Gao, 2021).

- Politika Desteği ve Ölçülebilirlik: Türkiye’de GeoAI uygulamalarına stratejik öncelik verilmesi gerekmektedir, çünkü mekânsal bilgi sektörünün

ekonomik büyüklüğü, GSYİH'ye katkısı ve uyduların verimliliği gibi temel metrikler bilinmemektedir (Güney, 2020). Bu ölçülebilirlik eksikliği, sektörün geleceğe yönelik stratejiler belirlemesini engellemektedir (Güney, 2020).

GeoAI'nin tarımsal sürdürülebilirlik, kaynak verimliliği ve iklim uyumu açısından stratejik bir teknoloji olduğu vurgulanmalıdır.

GeoAI, sadece bir verimlilik aracı değil, aynı zamanda tarım sektörünün gelecekteki çevresel ve iklimsel zorluklara karşı direncini artıran stratejik bir araçtır.

- **Kaynak Verimliliği:** GeoAI, kaynak yönetimini optimize etme (su, gübre) ve atıkları azaltma yeteneği sayesinde tarımsal sürdürülebilirliğe katkıda bulunur (Esri, 2025c; Smolarczyk, 2025). Hassas tarım ile su tüketiminde %50'ye varan azalma sağlanabileceği belirtilmiştir (Türker, 2017).

- **İklim Uyumu ve Dirençlilik:** GeoAI, afet yönetimi ve iklim dirençliliğinde kritik bir rol oynar (Esri, 2025c). İklim değişikliğinin etkilerini (kuraklık, su kıtlığı) modelleyerek (Degirmencioglu et al., 2019; Ertuğrul et al., 2022), kaynakların sürdürülebilir bir şekilde tahsis edilmesine yönelik veri odaklı karar verme süreçlerini destekler (Esri, 2025c; Türker, 2024b).

- **Sorumlu Teknoloji Gelişimi:** GeoAI'nın toplumsal faydasını maksimize etmek için, coğrafi önyargı (geo-bias) ve veri gizliliği gibi etik sorunlar, teknolojinin tasarım aşamasından itibaren ele alınmalıdır ("Tasarım Gereği Gizlilik") (McKenzie et al., 2023; Wang et al., 2024).

Bu stratejik yaklaşım, GeoAI'nın Türkiye'de sadece tarımsal verimliliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ülkenin çevresel ve ekonomik dirençliliğini de güçlendirmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Alastal, A. I., & Shaqfa, A. H. (2022). GeoAI Technologies and Their Application Areas in Urban Planning and Development: Concepts, Opportunities and Challenges in Smart City (Kuwait, Study Case). *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 10(02), 110–126.
- Ataç, Ş., & Kayabaşı, A. (2023). Görüntü İşlemeye Dayalı Yapay Zekâ Teknikleri Kullanılarak Rekolte Tahmini: Elma Ağacı Uygulaması. *KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 5(1), 67–84.
- Beyaz, A., & Gül, V. (2022). Determination of Low-Cost Arduino Based Light Intensity Sensors Effectiveness for Agricultural Applications. *Braz. arch. biol. technol.*, 65. doi:10.1590/1678-4324-2022220172
- Boutayeb, A., Cherif, I. L., & Khadimi, A. E. (2024). A comprehensive GeoAI review: Progress, Challenges and Outlooks. *ArXiv*.
- Degirmencioglu, A., Mohtar, R. H., Daher, B. T., Ozguntay-Ertugrul, G., & Ertugrul, O. (2019). Assessing the Sustainability of Crop Production in the Gediz Basin, Turkey: A Water, Energy, and Food Nexus Approach. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(4), 2511–2522.
- Ertuğrul, Ö., Özgünlaltay Ertuğrul, G., & Değirmencioglu, A. (2022). Su, Enerji ve Gıda Kaynaklarının İlişkisi ve Sürdürülebilir Tarımdaki Yeri. In Y. Banu & M. T. Tolon (Eds.), *Ziraat ve Su Ürünlerinde Kavramsal ve Olgusal Yaklaşımlar* (pp. 171–177). Akademisyen Yayınevi.
- Esri. (2025). GeoAI - CBS ve Yapay Zekanın Geleceği. Erişim adresi: <https://www.esri.com.tr/tr-tr/yetenekler/geoai/genel-bakis>.
- Esri. (2025). What Is GeoAI? | Accelerated Data Generation & Spatial Problem ... Erişim adresi: <https://www.esri.com/en-us/capabilities/geoai/overview>.
- Fauzi, C. (2024). A Review Geospatial Artificial Intelligence (Geo-AI): Implementation of Machine Learning on Urban Planning. *Proceedings of the International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science 2023 (iCAST-ES 2023)* (Vol. 230).
- Gao, S. (2021). Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI). *Geography*.
- GeoAI@UB – Geospatial Artificial Intelligence Lab. (2025). (Source: GeoAI@UB – Geospatial Artificial Intelligence Lab).

- Guney, C. (2020, 7 Temmuz). Globalde Hızlı Büyüeyen Mekansal Bilgi Endüstrisi Türkiye’de Ne Durumda?. *Medium*.
- Haseeb Saleh, H. J., Arrang, J., & Cardoso, L. M. O. D. B. (2025). Applications of Geospatial AI in Human Geography and Spatial Networks: A Literature Review. *EDRAAK*.
- Huang, X., Tu, Z., Ye, X., & Goodchild, M. (2025). The Role of Open-Source LLMs in Shaping the Future of GeoAI. *arXiv*.
- Kamel Boulos, M. N., Peng, G., & VoPham, T. (2019). An overview of GeoAI applications in health and healthcare. *International Journal of Health Geographics, 18*(1), 7.
- Li, W. (2020). GeoAI: Where machine learning and big data converge in GIScience. *Journal of Spatial Information Science, 20*, 71–77.
- Li, W. (2021). GeoAI and Deep Learning. In *International Encyclopedia of Geography* (pp. 1–6). Wiley.
- Li, W., & Hsu, C. Y. (2022). GeoAI for Large-Scale Image Analysis and Machine Vision: Recent Progress of Artificial Intelligence in Geography. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 11*(7), 422.
- Liu, P., & Biljecki, F. (2022). A review of spatially-explicit GeoAI applications in Urban Geography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 112*, 102936.
- Mai, G., Xie, Y., & Jia, X. (2025). Towards the next generation of Geospatial Artificial Intelligence. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- McKenzie, G., Zhang, H., & Gams, S. (2023). Privacy and Ethics in GeoAI. (Kaynak: Privacy and Ethics in GeoAI).
- Özaydın, E., Amirgan, B., Taşkın, G., & Musaoğlu, N. (2024). Derin öğrenme uygulamalarında kullanılan uzaktan algılama verilerinden oluşturulmuş açık kaynaklı bina veri setleri: Karşılaştırmalı değerlendirme. *Geomatik, 9*(1), 1–11.
- Özgünlaltay-Ertuğrul, G., Ertuğrul, Ö., & Degirmencioglu, A. (2019). Determination of Agricultural Mechanization Level of Kırşehir Province Using Geographical Information Systems (GIS). *Comptes Rendus de l’Académie Bulgare des Sciences, 72*(8), 1144–1152.
- Özüağ, S., & Ertuğrul, Ö. (2024). Enhanced Occupational Safety in Agricultural Machinery Factories: Artificial Intelligence-Driven Helmet

- Detection Using Transfer Learning and Majority Voting. *Applied Sciences*, 14(23), 11278.
- Pierdicca, R., & Paolanti, M. (2022). GeoAI: a review of Artificial Intelligence approaches for the interpretation of complex Geomatics data. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 11(1), 195–218.
- Polat, H. E., Koc, D. G., Ertugrul, Ö., Koc, C., & Ekinci, K. (2025). Deep Learning based Individual Cattle Face Recognition using Data Augmentation and Transfer Learning. *Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi)*, 31(1), 137–150. doi:10.15832/ankutbd.1509798.
- Sahana, K. S., Karthik, C. B., Sree, M. M., Chaithra, M., Abhinandithe, S. K., Snehalatha, B., Sridhar, R., Balasubramanian, S., & Madhu, B. (2022). Geospatial Artificial Intelligence (GeoAI): Applications in Health Care. *International Journal of Health and Allied Sciences*, 11(4), Article 4.
- Smolareczyk, T. (2025, 14 Temmuz). GIS and artificial intelligence: what is GeoAI?. (Kaynak: GIS and artificial intelligence: what is GeoAI?).
- Song, G. (2020). A Review of Recent Researches and Reflections on Geospatial Artificial Intelligence. (Erişim kaynağı).
- Song, Y., Kalacska, M., & Gašparović, M. (2023). Advances in geocomputation and geospatial artificial intelligence (GeoAI) for mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Türker, U. (2017). Hassas Tarımın Verimlilik üzerine etkileri. 6. Ulusal Verimlilik Kongresi. Ankara.
- Türker, U. (2024). Akıllı Tarım Teknolojileri Kullanımının Gıda ve Su Tasarrufu Üzerine Etkileri. In K. Şahin & İ. Erol (Eds.), *Gıda, Su Kaybı ve İsrافی* (s. 105-122) içinde. Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları.
- Uluğtekin, N. N., Başaraner, M., Güney, C., & Doğru, A. Ö. (2021). Kartografya ve Mekânsal Bilişimin Ara Kesitinde Yeni Eğilimler. 18. *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- UN-GGIM. (2015). *Future Trends in Geospatial Information Management: the Five to Ten Year Vision* (Second Edition). United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM).

- UN-GGIM. (2020). *Future Trends in Geospatial Information Management: the Five to Ten Year Vision* (Third Edition). United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM).
- Virrantaus, K., Fairbain, D., & Kraak, M.-J. (2009). ICA research agenda on cartography and GIScience. *Cartography and Geographic Information Science*, 39(2), 209–222.
- VoPham, T., Hart, J. E., Laden, F., & Chiang, Y.-Y. (2018). Emerging trends in geospatial artificial intelligence (geoAI): Potential applications for environmental epidemiology. *Environmental Health*, 17(1), 40.
- Wang, Z., Wu, N., Cao, Q., Xia, J., Liu, Z., Xie, Y., Nambi, A., Ganu, T., Lao, N., & Liu, N. (2024). GeoBS: Information-Theoretic Quantification of Geographic Bias in AI Models. *arXiv*.
- Xie, Y., He, E., Jia, X., Chen, W., Skakun, S., Bao, H., Jiang, Z., Ghosh, R., & Ravirathinam, P. (2022). Fairness by “where”: A statistically-robust and model-agnostic bi-level learning framework. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36, 12208–12216.

BÖLÜM 3

TARIMDA ROBOTİK DÖNÜŞÜM: SERA UYGULAMALARI İÇİN AKILLI HASAT SİSTEMLERİ

Arş. Gör. Osman Mert YAZ¹

Doç. Dr. Bahadır DEMİREL²

Arş. Gör. Özlem BAHAR³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18074265>

¹ Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye. mertyaz@erciyes.edu.tr, orcid id: 0009-0003-3367-6656

² Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye. bahdem@erciyes.edu.tr, orcid id: 0000-0002-2650-1167

³ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Kırşehir, Türkiye. ozlem.bahar@ahievran.edu.tr, orcid id: 0009-0002-2246-8790

1. GİRİŞ

Tarım sektöründe otomasyon ve akıllı sistemlerin önemi son yıllarda giderek artmaktadır. Özellikle iş gücü teminindeki zorluklar ve maliyetler dikkate alındığında, tekrarlayan ve zaman alıcı hasat işlemlerinin robotlar tarafından gerçekleştirilmesi büyük bir potansiyel sunmaktadır. Çilek ürünü, nazik yapısı ve çok kısa bir olgunluk hasat penceresi olması nedeniyle otomatik hasadı en zorlu meyvelerden biri olarak kabul edilir. Sera koşullarında çilek yetiştiriciliği yaygın olmakla birlikte, kontrollü çevre etmenlerine rağmen bitki yapraklarının meyveleri gölgelemesi, değişken ışık koşulları ve dar çalışma alanı gibi zorluklar söz konusudur. Dolayısıyla, otonom bir çilek toplama robotunun başarısı büyük ölçüde görsel algılama yeteneklerine bağlıdır. Robotun meyveleri doğru bir şekilde tespit edebilmesi, olgunluk durumlarını değerlendirebilmesi ve meyveyi bitkiye bağlayan sapın kesim noktasını milimetrik hassasiyetle belirleyebilmesi gerekmektedir (Xia, 2024). Bu sebeple, erken dönem çilek toplama robotu prototipleri daha çok renk eşikleme ve benzeri basit görüntü işleme tekniklerin dikkate alınarak yapılmaktadır. Örneğin Japonya'da geliştirilen ilk robotlarda olgun çilekler, kırmızı renk bileşenine getirilen eşik değerleriyle tespit edilmeye çalışılmıştır (Kondo ve ark., 1996). Benzer şekilde Hayashi ve ark. (2010), geliştirdikleri robotta renk eşikleme algoritmasıyla çileklerin kabaca olgunluk tahminini yapmayı denemiştir. Ancak bu geleneksel yöntemler ortam ışığı ve arka plan koşullarındaki değişimlere son derece duyarlı olup gerçek sera ortamında kararsız performans sergilemiştir. Meyve rengi çeşitlenebildiği, yaprak gölgeleri oluşabildiği ve meyveler kısmen yapraklarla örtülebildiği için yalnızca renge veya basit boyut eşiğine dayalı algılama yaklaşımı sık sık hatalı tespitler yapmış; olgunluk derecesini de yanlış değerlendirebilmiştir (Chen ve ark., 2024). Nitekim Şekil 1'de görüldüğü gibi, sadece renk eşik değerlerine dayalı basit segmentasyon yöntemleri değişken sera koşullarında kararlı sonuç vermemektedir (Feng ve ark., 2018). Ayrıca kamera görüntülerindeki parazitler, farklı bakış açılarından kaynaklanan perspektif hataları veya arka plandaki nesnelerin (toprak, yaprak döküntüsü vb.) meyveyle benzer renkte olması da klasik algoritmaların güvenilirliğini azaltır. Örtüşen birden fazla meyvenin tek bir büyük kütle gibi algılanması ya da yaprak/arka planın yanlışlıkla meyve sanılması gibi hatalar, prototip sistemlerde sıklıkla gözlemlenmiştir. Bu ilk nesil robotlar çoğu zaman yavaş çalışmış, pek çok

meyveyi atlamış veya olgunluk derecesini yanlış saptamıştır (Bechar ve Vigneault, 2016). Örneğin, Hayashi ve ark. (2010) tarafından gerçek tarla koşullarında test edilen bir prototip, olgun (kırmızı) çilekleri algılamada ancak %76 başarıya ulaşabilmiş, yeşil (olgunlaşmamış) meyveleri ise hiç tespit edememiştir. Bu sonuç, yaprakların meyveleri örtmesi veya arka plan bitki kısımlarının meyveyle benzer renkte olması durumlarında robotun ciddi şekilde zorlandığını göstermektedir.



Şekil 1: Renk eşik değerlerine dayalı basit segmentasyon uygulaması (Feng ve ark., 2018)

Günümüzde ise yapay zekâ ve derin öğrenme tabanlı bilgisayarlı görüş teknikleri, tarımsal robotik uygulamalarında devrim niteliğinde iyileştirmeler sağlamıştır. Evrimsel sinir ağları (CNN) kullanan modern nesne tanıma modelleri, karmaşık arka planlar ve kısmi meyve örtülmeleri durumlarında dahi yüksek doğrulukla meyveleri tespit edebilmektedir.

Derin öğrenme yöntemleri, çok sayıda etiketlenmiş görüntüyle eğitilerek insanın görsel algılama yeteneğine yakın performans sergileyebilmektedir. Elma, domates gibi farklı ürünler için derin öğrenmeye dayalı algılama sistemleri yüksek başarılar elde etmiştir (Tian ve ark., 2019; Wang ve ark., 2023). Çilek hasadı özelinde de son yıllarda YOLO (You Only Look Once) mimarisi öne çıkmış; bu tek-aşamalı nesne tespit modelleri yüksek doğruluk ile gerçek zamanlı çalışma imkânını bir araya getirmeyi başarmıştır (He ve ark., 2025). Örneğin derin öğrenme tabanlı yeni yöntemlerle olgunluk düzeyi farklı çileklerin %94'e varan F1 skoruyla tespit edilebildiği raporlanmıştır (Sun ve ark., 2023). Bu gelişmelerle birlikte otonom hasat robotlarının “görme” modülü önceki yaklaşımlara kıyasla çok daha güçlü hale gelmiştir. Bu bölümde, sera ortamında otonom hasat robotlarının görsel algılama teknikleri ve mekanik

uygulamaları detaylarıyla incelenerek mevcut prototiplerin başarıları ve kısıtları ortaya konulacak; geleceğe yönelik iyileştirme alanları tartışılacaktır.

2. SERA TARIMINDA OTOMASYONUN GEREKLİLİĞİ

Meyve hasadı yoğun emek gerektiren bir işlemdir ve geleneksel elle toplama, toplam üretim maliyetinin çok büyük bir kısmını oluşturabilmektedir (Chang ve Huang, 2024). Artan işçilik maliyetleri ve kırsal alanlarda nitelikli tarım işçisi bulmanın zorlaşması, tarımsal üretimde otomasyona yönelimi hızlandırmaktadır. Özellikle hasat gibi zaman kritikliğine sahip işlemlerde, uygun zaman aralığını kaçırmamak için insan gücüne dayalı yöntemler hem maliyetli hem de verimsiz kalabilmektedir. Sera tarımında otomasyonun gerekliliği, bir yandan bu ekonomik ve sosyal baskılardan kaynaklanırken diğer yandan ürün kalitesi ve standardizasyonunun artırılması hedefiyle de ilişkilidir. Teknolojik hasat sistemleri kesintisiz çalışma kabiliyetleri sayesinde hasat penceresini en etkin şekilde kullanabilir; başlangıçta yüksek olan yatırım maliyetlerinin uzun vadede geri dönüş sağlayacağı öngörülmektedir.

Modern seralarda kullanılan topraksız tarım teknikleri (hidroponik veya cocopeat gibi), bitkilerin yüksek yataklar veya askı sistemleri üzerinde yetiştirilmesine imkân tanır. Bu yetiştirme düzeni, otonom hasat robotları için daha standart bir çalışma ortamı sunar. Hasat işleminin mekanik otomasyona geçirilmesi durumunda, iş gücünden tasarruf sağlanabileceği gibi üründe standardizasyon da artacaktır (Yu ve ark., 2024). Örneğin, tüm meyvelerin benzer olgunluk düzeylerinde ve zamanında toplanabilmesi, pazara daha homojen ve yüksek kaliteli ürün sunulmasını mümkün kılar. Bunun yanında, sera ortamında kontrol edilebilen iklim koşulları ve düzenli sıra aralıkları, robotik sistemlerin tutarlı bir hızla çalışmasına elverişli alt yapı oluşturur. Yine de mevcut sera tasarımlarında insan hasadına göre düzenlenmiş bazı unsurların (sık dikim sıklığı, yaprak yoğunluğu vb.) robotik hasada uygun hale getirilmesi gerekebilir.

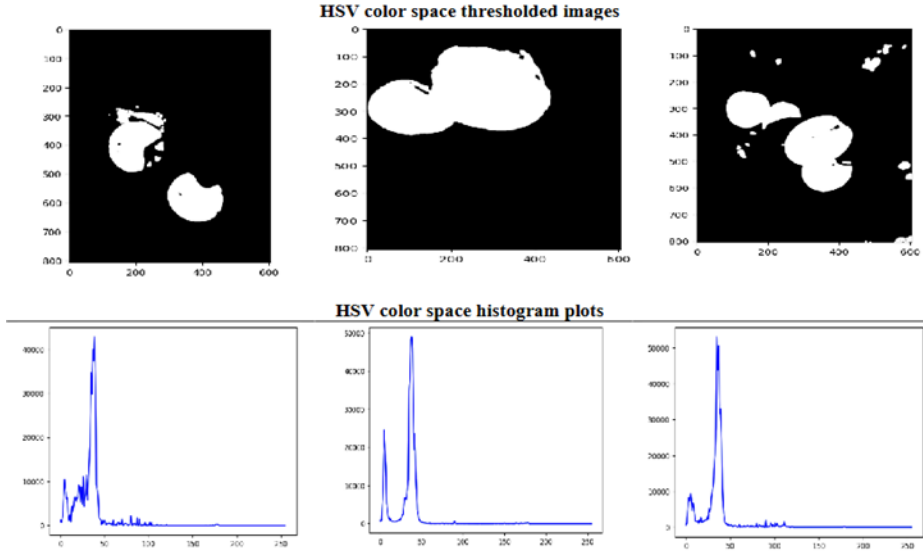
Sera tarımında otomasyonun bir diğer motivasyonu da sürdürülebilirlik ve verimlilikle ilgilidir. Otonom hasat robotları, 7/24 çalışarak hasadı en optimum zaman dilimlerinde gerçekleştirebilir ve olgun ürünü dalında bekletmeden toplayabilir. Bu sayede ürün kayıpları azalırken, insan faktörüne bağlı hata ve gecikmeler minimuma iner. Uzun vadede, iş gücü yükünü azaltan bu sistemlerin tarım sektöründe iş güvenliğini de artıracığı düşünülmektedir.

Özellikle tekrarlayan eğilme, uzanma gibi insan sağlığını zorlayan hareketlerin robotlarca üstlenilmesi, iş kazalarını ve mesleki kas-iskelet sorunlarını azaltacaktır. Sonuç olarak, sera ortamında otomasyon hem ekonomik hem de sosyal açılardan kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen otonom hasat robotları, yakın gelecekte tarımda dijital dönüşümün önemli bir parçası olmaya adaydır (Bechar ve Vigneault, 2016).

3. GÖRSEL ALGILAMA TEKNOLOJİLERİ

Otonom hasat robotlarında görsel algılama sistemi, robotun “gözü” işlevini göreyerek meyvelerin tespiti ve durum analizi görevlerini yürütür. İlk nesil hasat robotlarının bilgisayarlı görü modülleri görece basit algoritmalar içeriyordu. Geleneksel yöntemler arasında en yaygın olanı, olgun meyveleri renk eşikleme yoluyla tespit etmeye çalışmaktı. Örneğin Kondo ve arkadaşları (1996), geliştirdikleri prototip robotlarda çilek meyvelerini kırmızı renk bilgisine göre segmentasyon yaparak belirlemeye çalışmıştır. Benzer şekilde bazı erken dönem sistemler, meyvelerin kabaca dairesel şekline veya belirli büyüklükte olmasına dayanarak algılama yapmayı denemiştir (Hayashi ve ark., 2010; Yamamoto ve ark., 2014). Bu tür kural tabanlı algoritmalar kontrollü laboratuvar koşullarında kısmen başarılı olabilse de gerçek sera ortamındaki karmaşıklık karşısında yetersiz kalmıştır. Işık şiddetinin gün içinde değişmesi, meyve yüzeyinde parlama veya derin gölgelerin oluşması gibi etkenler renk tabanlı eşikleme yöntemlerinin kararlılığını bozar. Aynı şekilde, yaprak ve dalların meyvenin bir kısmını örtmesi durumuyla sıkça karşılaşıldığı için meyvenin yalnızca bir bölümü kameraya görünür olabilir. Sadece renge dayalı tespit, ışığın geliş açısı veya meyve çeşidi gibi faktörlere bağlı olarak ciddi hatalar verebilmektedir. Nitekim bazı çilek çeşitleri tam olgunlaştığında dahi üzerlerinde beyazımsı kısımlar kalabilir ya da hastalık nedeniyle anormal renklenmeler görülebilir; bu durum, yalnızca renk eşiği kullanan sistemlerin olgunluk değerlendirmesinde yanılgıya düşmesine yol açmıştır (Chen ve ark., 2024). Gerçek sera ortamından alınan görüntüler üzerinde yapılan deneyler, klasik HSV renk eşikleme yaklaşımlarının aydınlatma değişimlerine ve arka plan çeşitliliğine karşı ne denli hassas olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 2, sera içindeki örnek bir görüntünün HSV renk uzayında eşiklenmesi sonucu elde edilen maske görüntülerini ve histogramlarını göstermektedir. Meyve rengine

dayalı segmentasyonun ışık koşulları değiştiğinde tutarlılığını kaybettiği açıkça görülmektedir (Helmi ve ark., 2023).



Şekil 2: Klasik renk tabanlı segmentasyonu gösteren HSV eşikli görüntüler ve histogramlar (Helmi ve ark., 2023)

Geleneksel bilgisayarlı görü yöntemlerinin bir diğer zayıf noktası, çevresel faktörlere karşı dayanıklılığının düşük olmasıdır. Kamera görüntüsü, farklı açılardan kaynaklanan perspektif bozulmaları veya arka plan nesnelerinin (toprak, plastik malç vb.) meyveyle benzer renk tonlarına sahip olması, basit algoritmaların güvenilirliğini önemli ölçüde düşürmektedir. Örneğin, örtüşen birden fazla çilek yan yana büyüdüğünde, renk tabanlı sistem bunları tek bir büyük meyve olarak algılayıp birleşik bir tespit hatası verebilir. Bu tür kısıtlar nedeniyle ilk prototip hasat robotları çoğunlukla yavaş çalışmış, çok sayıda meyveyi tespit edemeden atlamış veya meyvelerin olgunluğunu yanlış değerlendirmiştir (Bechar ve Vigneault, 2016). Bu gözlemler, klasik yöntemlerin tarla ve sera koşullarında pratik bir çözüm olmaktan uzak olduğunu göstermiştir. Yaşanan bu zorluklar araştırmacıları, makine öğrenmesi ve gelişmiş görüntü işleme yöntemlerine yönelmeye sevk etmiştir.

Derin öğrenme öncesi dönemde bazı çalışmalar, meyve tespiti ve olgunluk sınıflandırması için destek vektör makineleri (SVM) veya karar ağaçları gibi algoritmaları renk/tekstür özellikleri ile besleyerek kullanmayı denemiştir (Chen ve ark., 2024). Ne var ki, arka planın karmaşık olduğu ve

koşulların değişkenlik gösterdiği gerçek ortamlarda bu yöntemlerin performansı sınırlı kalmıştır. Genel olarak, geleneksel yöntemlerin en büyük handikapı genelleme kabiliyetinin düşüklüğüdür; yani belirli bir ortam veya veri seti için ayarlanan algoritma, farklı sera veya tarlalarda hızlıca başarımlı kaybına uğrar. Bu noktada derin öğrenme yaklaşımları, öğrenilmiş özellik çıkarımı sayesinde güçlü bir alternatif çözüm olarak ortaya çıkmıştır.

4. DERİN ÖĞRENME TABANLI NESNE VE OLGUNLUK TESPİTİ

Son on yılda derin öğrenme kullanılarak geliştirilen nesne tespit modelleri, görüntülerde özellik çıkarma ve karar verme süreçlerinde üstün performans sergilemeye başlamıştır. Derin öğrenmenin en önemli avantajı, insan tarafından elle tanımlanan kural setlerine ihtiyaç duymadan karmaşık görsel örüntüleri öğrenebilmesidir. Nitekim evrimsel sinir ağları (CNN) tabanlı modeller, yaprak gibi arka plan unsurlarıyla kısmen örtülmüş meyveleri dahi yüksek doğrulukla tespit edebilmekte ve aynı anda sınıflandırma da yapabilmektedir (Tian ve ark., 2019). Tarımsal alanda elma, domates, üzüm gibi pek çok üründe derin öğrenme tabanlı tespit ve sayım uygulamalarının başarılı sonuçlar verdiği literatürde gösterilmiştir (Tian ve ark., 2019; Wang ve ark., 2023). Bu yaklaşımlar, geleneksel yöntemlerin baş edemediği örtüşme (occlusion) ve değişken aydınlatma problemlerine daha dayanıklı olmalarıyla öne çıkmaktadır.

İlk dönemde tarımsal nesne tespiti için R-CNN, Faster R-CNN, SSD, RetinaNet gibi genel amaçlı derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Örneğin Ge ve ark. (2019), bahçe ortamında çekilen görüntüler üzerinde çilekleri tespit ve konumlandırmak için örneklem tabanlı segmentasyon (instance segmentation) yöntemini uygulamıştır. Bu çalışmada Mask R-CNN mimarisıyla her bir çilek meyvesinin konumu ve piksel bazlı maskesi yüksek doğrulukla belirlenmiştir. Segmentasyon tabanlı yaklaşımlar, her pikselin hangi nesneye ait olduğunu tayin edebildiğinden meyvelerin yapraklardan ayrılması ve birbirine bitişik meyvelerin tek tek tespiti konusunda avantaj sağlar. Nitekim Pérez-Borrero ve ark. (2021), tam evrimsel sinir ağı (FCN) tabanlı yeni bir çilek segmentasyon yöntemiyle karmaşık arka planlarda bile başarılı sonuçlar elde etmiştir. Ancak ayrık nesne maskeleri üreten bu tür segmentasyon

modelleri, çoğunlukla daha yavaş çalışmakta ve gerçek zamanlı uygulamalarda dezavantaj yaratmaktadır.

Tarımsal robotik uygulamalarda gerçek zamanlılık kritik öneme sahip olduğundan, tek-aşamalı (one-stage) nesne tespit modelleri giderek daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Bu bağlamda YOLO ailesi modeller, görüntüyü tek seferde hızlıca işleyip aynı anda birden fazla nesneyi tespit edebilmesi sayesinde öne çıkmıştır. YOLO modelleri özellikle küçük nesnelere ve yoğun sahneleri tespit etme kabiliyeti ile birçok tarım uygulamasında kullanılmaktadır. Örneğin geliştirilen bir sistemde, YOLOv3 modelinin iyileştirilmiş bir versiyonu ile farklı büyüme evrelerindeki elmalar bahçe ortamında başarılı şekilde tespit edilmiştir (Tian ve ark., 2019). Benzer şekilde sera domatesleri için hafifletilmiş bir YOLOv5 modeli gerçek zamanlı ve yüksek doğruluklu tespit sağlamıştır (Wang ve ark., 2023). Çilek hasadı konusunda da YOLO tabanlı çözümler hızla yaygınlaşmıştır. He ve ark. (2022), açık tarla koşullarında çilek meyvelerinin merkez noktalarını tespit etmek üzere YOLOv4 modelini uygulamış; 100 test görüntüsü üzerinde olgun çilekleri algılamada %91'in üzerinde ortalama başarı elde etmiştir. Bu sonuç, derin öğrenme modellerinin karmaşık arka planlara rağmen insana yakın doğruluklara ulaşabildiğini göstererek bu alandaki beklentiyi yükseltmiştir.

Derin öğrenme tabanlı tespit modellerinde sürekli bir gelişim yaşanmakta, her yeni mimari bir öncekinin zayıflıklarını hedef alarak daha iyi bir denge sunmaktadır. YOLO mimarisinin en yeni ve güçlü temsilcilerinden biri olan YOLOv8 modeli, yüksek tespit doğruluğunu hızlı çalışmayla birleştiren başarılı bir örnek olarak öne çıkmıştır. YOLOv8, önceki sürümlere kıyasla daha derin ve verimli bir omurga (backbone) ile boyun (neck) yapısına sahip olup farklı ölçeklerdeki nesnelere yakalamak için ileri seviye özellik birleştirme yöntemleri kullanır. Literatürde YOLOv8'in tarımsal görüntüler üzerinde üstün performans sergilediği; özellikle sera ortamında çilek gibi küçük ve yaprak arasında gizlenebilen meyvelerin tespitinde dikkat çekici başarılar elde ettiği belirtilmektedir (Chen ve ark., 2024; He ve ark., 2025).

Araştırmacılar, YOLOv8 modelini doğrudan kullanmanın yanı sıra özgün uygulama gereksinimleri doğrultusunda özelleştirip geliştirmektedir. Bu kapsamda, çilek hasadı için önerilen bazı iyileştirilmiş YOLOv8 türevleri literatürde öne çıkmıştır. Chen ve ark. (2024), YOLOv8 modelinin çilek olgunluk tespiti görevine uyarlanmış bir versiyonu olan CES-YOLOv8

algoritmasını önermiştir. Bu modelde YOLOv8'in orijinal omurga katmanlarının bazıları ConvNeXt-v2 modülüyle değiştirilmiş ve önemli özellikleri vurgulamak için Efficient Channel Attention (ECA) mekanizması entegre edilmiştir. Ayrıca kayıp fonksiyonu olarak Scaled IoU (SIoU) tercih edilerek modelin kutu konumlandırma hassasiyeti artırılmıştır. Yapılan deneylerde CES-YOLOv8 modeli, karmaşık sera koşullarında orijinal YOLOv8'e kıyasla belirgin bir performans artışı göstermiş; ortalama doğruluk (mAP) değerinde %92 seviyesine ulaşmıştır. Modelin hassasiyet, doğruluk ve F1 skorlarında da baz modele göre %2–5 aralığında iyileşme kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, iyileştirilmiş modelin farklı ışık, açı ve kısmi gizlenme senaryolarında dahi olgun ve olgunlaşmamış çilekleri güvenilir biçimde ayırt edebildiğini ortaya koymaktadır. Benzer bir geliştirme olarak He ve ark. (2025), YOLOv8 mimarisine geniş çekirdekli evrişim blokları entegre ederek RLK-YOLOv8 modelini geliştirmiştir. "RLK" kısaltması, modelde kullanılan RepLKNet tabanlı Repeatable Large Kernel yapısına işaret etmektedir. Bu model, çileğin tüm büyüme döngüsündeki farklı aşamalarındaki meyveleri (yeşil meyveden tam kırmızı olguna kadar) yüksek doğrulukla tespit etmeye odaklanmıştır. YOLOv8'in omurgasına eklenen büyük çekirdekli evrişimler ve iyileştirilmiş boyun yapısı sayesinde yaprakların arasında kısmen gizlenmiş meyvelerin atlanmadan bulunması hedeflenmiştir. Ayrıca modelde dinamik kafa (DynamicHead) ve çok ölçekli özellik birleştirme gibi ileri teknikler kullanılarak, yoğun yapraklı sahnelerde meyvelerin gözden kaçma oranı azaltılmıştır. Yapılan deneysel değerlendirmelerde RLK-YOLOv8 modeli, tam büyüme döngüsü tespit görevinde yaklaşık %95.4 ortalama doğruluk (mAP) elde etmiştir. Bu değer, benzer koşullarda YOLOv8'in temel modeline kıyasla yaklaşık %3'lük bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Ayrıca modelin ortalama hassasiyet ve F1 skorlarının da %95 düzeyinde olduğu rapor edilmiştir. Bu yüksek başarı oranı, özellikle yaprak gölgelerinin neden olduğu kısmi gizlenme durumlarında ve farklı boyutlardaki meyvelerin aynı anda bulunduğu sahnelerde geniş çekirdekli evrişim ve gelişmiş başlık yapılarının etkili olduğunu göstermektedir.

Nesne tespit modülünün bir diğer kritik işlevi de meyvenin olgunluk durumunu belirlemek ve hasada uygunluğunu saptamaktır. Renk ve dokuya dayalı klasik yöntemler, çevresel koşullardan (ışık şiddeti, gölge durumu, meyve çeşidine bağlı renk farklılıkları vb.) kolayca etkilenebildiği için derin

öğrenmeyle entegre olgunluk sınıflandırma çok daha güvenilir bulunmuştur. Bu amaçla bazı çalışmalarda nesne tespit ağına ek bir başlık veya çoklu çıkış eklenerek, tespit edilen her çilek için olgunluk sınıfı da eşzamanlı olarak üretilmektedir. Örneğin Xia (2024), YOLOv8 modeline entegre edilen bir "pose" eklentisi ile her çileğin sap noktasını tespit eden ve renk özelliklerine dayanarak olgunluğunu sınıflayan bir sistem geliştirmiştir. Bu geliştirilmiş YOLOv8-Pose modeli sayesinde, bir meyve tespit edildiğinde hem hasada uygun olup olmadığı anlaşılabilir hem de sapın nereden kesileceği anında belirlenmektedir. Söz konusu çalışma, olgunluk ve sap kesim noktası tespitini bir arada yaparak hasat işlemini hızlandırmayı başarmıştır. İyileştirilmiş YOLOv8-Pose modeli, bu entegre görevde %97.8 gibi son derece yüksek bir ortalama doğruluk değeri elde etmiş ve temel YOLOv8 modeline göre ~%5.5'lik bir performans artışı sağladığı rapor edilmiştir (Xia, 2024). Burada mAP metriği hem çileklerin hem de ilgili sap kesim noktalarının doğru saptanma oranını birlikte ifade etmektedir. YOLOv8-Pose modelinin belki de en çarpıcı sonucu, tespit edilen sap noktalarının üç boyutlu konumlandırma doğruluğundadır: Bir RGB-D derinlik kamerası entegrasyonu ile her bir sap kesim noktasının gerçek uzaydaki koordinatı hesaplandığında ortalama konum hatasının yalnızca ~0.63 cm olduğu görülmüştür (Xia, 2024). Bu sonuç, bir hasat robotunun meyvenin yerini, olgunluğunu ve kesim noktasını neredeyse insan seviyesinde doğrulukla belirleyebileceğini göstermesi açısından oldukça önemlidir. Derin öğrenme tabanlı bu tür yöntemler, yaprak gölgesi nedeniyle rengi tam kırmızı görünmeyen ancak aslında olgunlaşmamış bir meyveyi daha doğru değerlendirebilmek gibi ince ayrımları da yakalayabilmektedir. Gerçekten de derin modeller, renk, doku ve şekil gibi birden fazla ipucunu birlikte değerlendirdiğinden, yalnızca renge bakarak karar veren geleneksel yaklaşımlara kıyasla olgunluk tayininde çok daha isabetli sonuçlar vermektedir. Bu kapsamda literatürde farklı derin öğrenme modellerinin olgunluk tespit performansları da karşılaştırılmıştır. Şekil 3, çilek meyvelerinin olgunluk sınıflandırmasında kullanılan çeşitli derin öğrenme modellerinin başarılarını göstermektedir; bu karşılaştırma, özel olarak iyileştirilmiş YOLO tabanlı modellerin olgunluk tespitinde en yüksek doğruluğa ulaştığını ortaya koymaktadır (Chen ve ark., 2024).

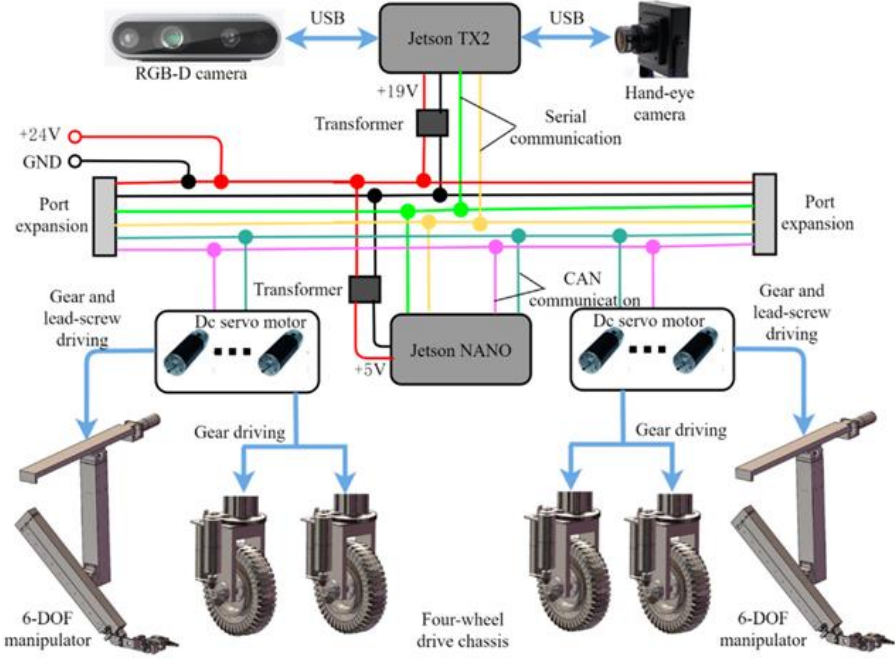


Şekil 3: CES-YOLOv8, YOLOv8, YOLOv5, YOLOv7, Faster R-CNN ve RetinaNet derin öğrenme modelleri tarafından üretilen çilek olgunluk tespit sonuçlarının, çeşitli olgunluk aşamalarında değerlendirilendirme karşılaştırması (Chen ve ark., 2024)

5. ÜÇ BOYUTLU KONUMLANDIRMA VE DERİNLİK ALGISI

Bir otonom hasat robotunun meyveyi başarıyla toplayabilmesi için, görsel algılama sisteminin sadece meyvenin görüntü üzerindeki varlığını tespit etmesi yeterli değildir. Robotik kolun meyveye uzanabilmesi için meyvenin gerçek dünya koordinatlarının (x, y, z) hassas biçimde hesaplanması gerekir. Bu amaçla yaygın olarak stereo kameralar, yapılandırılmış ışık sensörleri veya doğrudan derinlik ölçebilen RGB-D kameralar kullanılmaktadır. Örneğin çift lensli stereo bir kamera kullanıldığında, aynı sahnenin iki farklı açıdan görüntüsü alınarak her bir çileğin iki görüntüdeki piksel konumları arasındaki fark hesaplanabilir; buradan hareketle meyvenin kamera düzlemine olan mesafesi (derinliği) üçgenleme ile bulunabilir. Bir diğer yaygın yaklaşım, yapılandırılmış ışık tabanlı derinlik kameralarıdır. Bu sistemlerde kızılötesi bir projeksiyonla ortama belirli bir desen yansıtılır ve kameranın algıladığı desen bozulmaları kullanılarak sahnedeki her noktaya ait derinlik değeri (kameraya uzaklık) piksel düzeyinde çıkarılır. Günümüzde ticari olarak temin edilebilen Intel RealSense D435 gibi RGB-D kameralar, tek bir kompakt cihaz içerisinde hem yüksek çözünürlüklü renkli görüntü hem de derinlik haritasını birlikte sunabilmektedir. Çilek hasat robotlarında bu tip sensörlerin kullanımı, hem olgunluk değerlendirmesi için renk bilgisini hem de konum hesaplama için

derinlik bilgisini aynı anda edinmeye imkân vermektedir. Şekil 4, tipik bir otonom çilek hasat robotunun donanım ve kontrol mimarisini özetlemekte olup bir RGB-D kamera ile çift kontrollü (görsel ve hareket kontrolü) bir sistem entegrasyonunu göstermektedir (Yu ve ark., 2024).



Şekil 4: Çilek hasat robotunun donanım ve kontrol sistemi mimarisini, RGB-D kamera, çift gömülü kontrolör, DC servo motorlar ve hassas 3D meyve konumlandırma için çok modüllü iletişim yolları sistem entegrasyonu (Yu ve ark., 2024)

Görüntü algılama modülü tespit ettiği meyvelerin piksellerini işaretlerken, derinlik modülü bu piksellerin gerçek uzaydaki koordinatlarını milimetrik doğrulukla hesaplamaktadır. Yu ve ark. (2024), YOLOv7-tabanlı bir meyve algılama modelini RealSense derinlik kamerasından alınan verilerle birleştirerek çileklerin 3B konumunu hesaplamış ve prototip sistemlerinde milimetre mertebesinde konum hatası ile robot kolunu hedefe yönlendirmeyi başarmışlardır. Benzer şekilde, yukarıda bahsedilen YOLOv8-Pose tabanlı sistemde de tespit edilen her bir çileğin sap kesim noktası, elde edilen derinlik haritasına yansıtılarak gerçek dünyadaki koordinatı çıkarılmıştır; bu sayede ortalama pozisyonlama hatası 0.63 cm gibi son derece düşük bir düzeye indirilmiştir (Xia, 2024). Bu sonuç, robot kolunun meyveye ulaşırken

neredeysi sapı hedef alıp kesme işlemini insan becerisine yakın bir hassasiyetle gerçekleştirebildiğini göstermektedir.

Derinlik algısının güvenilir olması, özellikle yaprak yoğunluğunun fazla olduğu ortamlarda çarpışmasız bir kol hareket planı oluşturmak için kritik önemdedir. Robot, derinlik bilgisi sayesinde meyveye sadece doğru konumda değil, aynı zamanda doğru açıyla yaklaşabilir; böylece yaprak ve dallara takılmadan hedefe uzanabilir. Bu da hasat sürecinin hızını ve verimini doğrudan etkiler (Dai ve ark., 2025). Bazı gelişmiş sistemler, tek bir kameradan ziyade çoklu kamera düzenekleri veya hareketli kamera sistemleri kullanarak meyvelere farklı açılardan bakmayı ve “kör nokta” sorununu en aza indirmeyi hedeflemektedir. Ge ve arkadaşları (2019), Norveç’te geliştirdikleri bir prototipte “Cartesian dual-track” adı verilen iki raylı mekanizma üzerinde hareket eden çift kamera kullanmış ve çilekleri farklı perspektiflerden görüntüleyerek tespit oranını artırmıştır. Bu çok perspektifli yaklaşım sayesinde, tek bir açıdan görünmeyen meyveler diğer açıdan kameraya görünür hale gelmiş ve algılama başarı oranı yükselmiştir. İleride, çok kameralı veya hareketli kameralı görüş sistemlerinin maliyetleri düştükçe ve algoritmalar daha da hızlandıkça, bu tür yaklaşımların otonom hasatta performansı artırması beklenmektedir. Sonuç olarak, derinlik algılama ve 3B konumlandırma becerisi, otonom hasat robotlarının etkinliği açısından vazgeçilmez bir bileşen haline gelmiştir. Güncel araştırmalar, stereo kamera yerine kamera-LiDAR füzyonu, aktif sensörlerle yapay derinlik haritası iyileştirme gibi tekniklerle 3B algının doğruluk ve güvenilirliğini daha da artırmaya odaklanmaktadır.

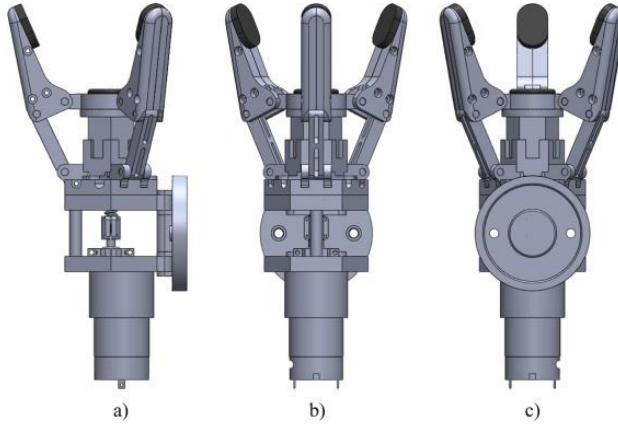
6. ROBOTİK KOLLAR VE UÇ-EFEKTÖR TASARIMLARI

Otonom hasat robotlarının mekanik bileşeni, meyveyi fiziksel olarak bitkiden ayıran robotik kol ve uç-efektör mekanizmasıdır. Bu kısım, robotun “eli” olarak düşünülebilir ve tasarımındaki öncelikli kriter, meyvenin hasat sırasında zarar görmemesini ve bitki dalına minimum hasar verilmesini sağlamaktır. Literatürde çeşitli gripper (kavrayıcı) ve kesici uç-efektör tasarımları önerilmiş olup bunların karşılaştırmalı analizleri mevcuttur (Han ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2020). Genel eğilim, meyveye doğrudan temas eden yumuşak kavrayıcılar veya hiç temas etmeyen kesme-tutma mekanizmaları yönündedir. Çilek gibi narin meyveler için literatürde en başarılı bulunan

çözüm, meyveyi daldan sapından keserek ayırmak ve aynı anda alttan destekleyerek yakalamaktır. Bu sayede meyvenin yüzeyine doğrudan sert bir temas olmayacağı için ezilme, çizilme gibi zararlar en aza indirilir. Nitekim günümüze dek geliştirilen pek çok prototip sistemde uç-efektörler, makas mekanizması ile sap keserken eşzamanlı bir yumuşak destekleyici aparatla meyveyi düşmeden tutacak biçimde tasarlanmıştır. Chang ve Huang (2024) tarafından geliştirilen robotik kol sisteminde uç-efektör, iki aşamalı çalışmaktadır: entegre bir makas mekanizması meyvenin sapını keserken senkronize çalışan iki parmaklı bir kavrayıcı, koparılan meyveyi altından hemen yakalayıp desteklemektedir. Böylece meyve, dalından ayrıldığı anda kontrollü şekilde tutulmakta ve yere düşüp zedelenmesi engellenmektedir. Bununla birlikte, bu yaklaşımda dahi bazen çilek sapının yanlış noktadan kesilmesi veya kesildikten sonra meyvenin kayarak yere düşmesi gibi riskler tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle yeni nesil sistemler, her bir meyvenin sap kesim noktasını görsel olarak belirleyip makas mekanizmasını milimetrik hassasiyetle yönlendirmeye odaklanmaktadır. Ancak dalların ve yaprakların sapla benzer renkte olabileceği veya sapın meyve tarafından kısmen gizlenebileceği durumlar, salt görsel belirleme için güçlük oluşturur. Bu sorunu aşmak üzere He ve ark. (2022), tarla ortamında çilek saplarının merkezini tespit etmeye yönelik özel bir algoritma geliştirmiş ve robot kolunu ilgili noktaya yönlendirmeyi başarmıştır. Yine de pratikte, sapı her koşulda tam doğru yerden kesebilmek için muhtemelen görsel algının ötesinde dokunsal geri besleme veya kuvvet sensörleri gibi ek duylardan yararlanmak gerekecektir.

Hasat robotlarında robotik kol genellikle 5 veya 6 serbestlik dereceli (DOF) eklemlerden oluşan artiküle bir manipülatördür. Bu kollar, elektrik motorları veya servo sistemlerle tahrik edilerek meyveye uzanma, gerekli açıyı yakalama ve kesme işlemini uygulama kabiliyetine sahiptir. Birçok prototipte endüstriyel robot kolların modifiye edilmiş halleri veya özel hafif malzemelerden üretilmiş kol sistemleri kullanılmaktadır. Örneğin bazı tasarımlarda ABS ve alüminyum gibi hafif malzemelerle gövde imal edilip Nema 17 ve Nema 23 step motorlar ile eklem hareketleri sağlanmıştır. Robotik kolun boyutları ve erişim mesafesi, seradaki yatak düzenine ve bitki boyutlarına göre optimize edilir. Genellikle çilek seralarında yataklar yaklaşık bel seviyesinde yükseklikte olduğundan, kolun erişim geometrisi bu seviyeyi

kapsayacak şekilde ayarlanır. Ayrıca kolun üzerindeki tutucu uç, gerektiğinde dar aralıklara girebilecek şekilde kompakt boyutta tasarlanır. Uç-efektör tasarımında kaydedilen yenilikler, çilek gibi narin ürünlerin zarar görmeden toplanmasına önemli katkılar sağlamıştır. Örneğin makaslı kesme ile yumuşak destekleme mekanizmalarının birlikte kullanıldığı çözümler, ürün kalitesini koruyarak hasat edilebilirliği artırmıştır. Bu alanda Şekil 5, yumuşak meyve toplanması için geliştirilmiş üç parmaklı bir kavrayıcı prototipinin tasarımını göstermektedir (Russo ve ark., 2017). Görüldüğü üzere bu kavrayıcı, hassas bir el gibi meyvenin yüzeyine geniş alanda düşük basınçla temas etmekte ve vakum yardımıyla meyveyi nazikçe kavrayabilmektedir. Bu kavrayıcı tasarımı doğrudan çilek için uygulanmamış olsa da yumuşak meyvelerin hasarında basıncı geniş alana yayarak zedelenmeyi önlemek açısından umut vaat etmektedir (ancak çilek sapından kesme yaklaşımı kadar yaygınlaşmamıştır).



Şekil 5: Üç parmaklı vakum destekli yumuşak meyve tutucunun CAD model görüntüleri, (a) yandan görünüm, (b) önden görünüm ve (c) nihai montajın alttan görünümü (Russo ve ark., 2017)

Otonom hasat robotlarının verimliliğini artırmak amacıyla, aynı anda birden fazla meyveyi toplayabilen sistem tasarımları üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. İnsan işçiler, ustalıklı bir hareketle birden fazla çileği arka arkaya koparabilirken mevcut robotlar genellikle meyveleri tek tek işlemektedir. Bu farkı kapatmak için bazı araştırma grupları, robotik kolun hareketini optimize eden akıllı rotalama algoritmaları geliştirmekte veya aynı anda birden çok meyveyi kavrayabilen özel çoklu gripper tasarımları üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çok kollu sistemler kuramsal olarak birim zamanda

toplanan meyve sayısını önemli ölçüde artırabilir. Nitekim laboratuvar ortamında denenmiş çift kollu bir prototipin, tek kollu eşdeğerine göre toplama süresini bir meyve için yaklaşık 4 saniyeye kadar düşürdüğü rapor edilmiştir (Yu ve ark., 2024). İki bağımsız kol, ortak bir hareket platformu üzerinde senkronize çalışarak sıra boyunca ilerlemekte ve aynı anda iki farklı meyveyi hedefleyebilmektedir. Bu tasarım, operasyonel verimlilik açısından önemli bir gelişme olmakla birlikte mekanik karmaşıklığı ve kontrol zorluklarını da beraberinde getirir.

Robotik sistem tasarımında sadece makine boyutlarının değil, aynı zamanda malzeme ve koruma özelliklerinin de sera ortamına uygun olması gerekir. Sera içinde yüksek nem, sulama suyu, toz ve aşındırıcı kimyasallar bulunabileceğinden elektronik ve mekanik parçaların dayanıklılığı kritik önemdedir. Bu sebeple bazı tasarımlar, su ve toz geçirmezlik (IP koruma sınıfları) özellikleri yüksek bileşenler kullanmakta ve eklem yerlerini koruyucu muhafazalar içine almaktadır. Chang ve Huang (2024), geliştirdikleri robotik kolun kritik parçalarını paslanmaz malzemeden ve kapalı bir gövde içerisinde tasarlayarak yüksek nemli sera koşullarına uyum sağlamayı hedeflemiştir. Bu sayede sürekli bakım gerektirmeden uzun süre çalışabilecek, dayanıklı bir sistem elde edilmesi amaçlanmıştır. Benzer şekilde, hareketli parçaların daha az sürtünme ve yıpranma ile çalışması için kendi kendini yağlayan yataklar, korozyona dayanıklı kaplamalar gibi mühendislik önlemleri de tartışılmaktadır.

Hasat robotlarının başarısını artırmak için tartışılan önemli bir konu da tarımsal altyapının robota uygun hale getirilmesidir. Yukarıda değinildiği gibi, eğer bitkiler üzerinde çiçek ve meyve seyreltmesi yapılmışsa veya yapraklar budanarak meyveler daha görünür hale getirilmişse, robotun algılama ve toplama performansı belirgin biçimde yükselmektedir. Bu durum, geleneksel tarım yöntemlerinin robotik hasat göz önüne alınarak yeniden düzenlenmesi gereğini ortaya koyar. Örneğin bazı üreticiler, robot kullanımını kolaylaştırmak adına çilek çeşitlerini daha dikine büyüyen veya yaprakları meyveyi daha az örten türlerden seçmeyi düşünmektedir. Aynı şekilde meyvelerin aynı yükseklikte büyümesini sağlayan askı sistemleri veya "A-frame" şeklindeki sera iskelet düzenekleri, robotların işini kolaylaştıracak altyapı çözümleri olarak önerilmektedir. Yani tarımsal uygulama tarafında yapılacak ufak değişiklikler, robotun verimini ve başarısını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu

nedenle mühendislik geliştirmelerinin yanı sıra bitki yetiştirme tekniklerinin de “robot dostu” olacak şekilde optimize edilmesi gelecekte önem kazanacaktır.

7. SONUÇ VE GELECEK ÖNGÖRÜLERİ

YOLOv8 ve türevi derin öğrenme modellerinin sağladığı yüksek doğruluk sayesinde, çilek gibi yapraklar arasında gizlenen ve arka planı karmaşık ortamlarda dahi meyvelerin güvenilir şekilde algılanması mümkün hale gelmiştir. Özellikle büyük çekirdekli evrişimler, çoklu ölçekli özellik birleştirme (FPN, BiFPN gibi) ve dikkat mekanizmaları entegre edilerek geliştirilen modeller, örtüşen ve kısmi gizlenmiş meyvelerin tespitinde önceki nesil algoritmalara kıyasla anlamlı iyileşmeler göstermektedir (He ve ark., 2025). Bu gelişmeler, hasat robotlarının “görme” kabiliyetini tartışmasız şekilde insan performansına yaklaştırmıştır. Bununla birlikte, görüntü işleme tarafında hala çözülmesi gereken sorunlar vardır. En büyük zorluklardan biri, bitki yaprak ve dallarının meyveleri engellemesi problemidir. Tek bir kamerayla bakıldığında görüş alanı dışında kalan meyveler kaçınılmaz biçimde tespit edilemeyecektir. Bu sorunu aşmak için gelecekte birden fazla kamerayla farklı açılardan görüntü alma veya hareketli kamera sistemleri kullanma yaklaşımları öne çıkabilir. Ge ve ark. (2019) tarafından geliştirilen sistem, çift ray üzerinde hareket eden kameralarla farklı perspektiflerden görüntü alarak meyve tespit oranını artırmayı başarmıştır. Çok kameralı görüş sistemlerinin yaygınlaşması, ileride donanım maliyetlerinin düşmesiyle beraber pratik hale gelerek tek bir açıdan kaynaklanan kör nokta problemini büyük ölçüde hafifletebilir.

Bir diğer tartışma konusu, algılama ve toplama arasındaki zaman uyumudur. En yüksek doğruluğa sahip model dahi pratikte başarılı olabilmek için gerçek zamanlı çalışabilmelidir. Derin modeller genellikle yüksek hesaplama gücü gerektirdiğinden, sahada gerçek zamanlı performans için optimizasyon gereklidir. YOLOv8 modelinin GPU tabanlı gömülü cihazlarda (ör. NVIDIA Jetson serisi) gerçek zamanlı olarak çalıştırılabildiği gösterilmiştir (Chen ve ark., 2024). Ancak model iyileştirmeleri çoğu zaman parametre sayısını ve hesaplama yükünü artırdığı için pratik uygulamada bir dengeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı araştırmacılar, YOLOv8’in hafif sürümlerini (nano veya tiny versiyonları) kullanarak hız kazanmaya çalışırken bir miktar doğruluk kaybını göze almıştır. Wang ve ark. (2023), sera cherry domateslerinin

olgunluk tespiti için YOLOv5n modelini optimize ederek ortalama %95.2 doğruluk elde etmiş ve bu modeli gerçek zamanlı gömülü sistemde çalıştırabilmiştir. Benzer şekilde, çilek hasadı özelinde de model boyut-hız optimizasyonu gelecekte önemli bir araştırma alanı olacaktır. Bazı çok yeni çalışmalar, anahtar nokta tespiti yapan derin modellerin yapısını sıkılaştırmak için dalgacık tabanlı alt örnekleme modülleri eklemek ve katman-bağımlı budama (pruning) teknikleri uygulamak suretiyle parametre sayısını %60'tan fazla azaltırken algılama doğruluğunu %97 seviyelerinde tutmayı başarmıştır (Dai ve ark., 2025). Bu tür yenilikler, pratikte robot üzerinde gerçek zamanlı çalışacak küçük ama çevik modellerin yolunu açacaktır. Özellikle birden fazla görevi aynı anda yapan (multi-task) ağlar kullanıldığında algoritmanın yavaşlama ihtimali olduğundan, donanım hızlandırma ve model sıkıştırma tekniklerinin devreye girmesi gerekebilecektir.

Robotik kol ve uç-efektör tarafında ise tartışmanın önemli bir boyutu, sistemin meyveye fiziksel zarar vermeden ve bitkiye asgari hasarla hasat yapabilmesidir. Güncel prototiplerde farklı kavrayıcı ve kesici tasarımları denenmiş olup, bunların etkinliği üzerine kapsamlı değerlendirmeler yapılmaktadır (Zhang ve ark., 2020). Genel olarak, meyveyi doğrudan kavrayan yumuşak gripper'lar ile sapı kesip meyveyi tutan mekanizmaların artıları ve eksileri bulunmaktadır. Çilek için sapı kesip altından destekleme yaklaşımı en başarılı sonuçları verdiği için yeni sistemler bu yöntemi hassasiyet ve güvenilirlik açısından mükemmelleştirmeye çalışmaktadır. Örneğin sap kesim noktasının doğru belirlenmesi ve kesici aletin tam istenen noktaya yönlendirilmesi konusu hala aktif bir araştırma alanıdır. He ve ark. (2022) gibi çalışmalar, görüntü işleme ile sap merkezini bularak robotu oraya yönlendirmeyi başarsa da bazı durumlarda dokunma duyusunun da sisteme entegre edilmesinin kesme hatalarını telafi edebileceği düşünülmektedir. Gelecekte akıllı uç-efektörler üzerinde kuvvet sensörleri veya yapay deri tabakaları kullanılarak hem meyveye temas anındaki baskı kontrol edilebilir hem de kesme işlemi sırasında sapın ayrıldığı geri bildirim alınabilir. Bu sayede hem meyve ezilmeden kavranır hem de sap tam kopmadan çekilmez, böylece bitki dalı da zarar görmez.

Tarımsal bakış açısıyla, robotik hasada geçişin başarılı olabilmesi için insan işgücü ile robot etkileşiminin iyi yönetilmesi ve çiftçilerin bu teknolojiye adaptasyonu da geleceğin konularındandır. İlk etapta robotlar tüm meyveleri

toplayamadığında geriye kalan meyvelerin insan tarafından tamamlanması gerekebilir; bu noktada karma (hibrit) hasat modelleri geliştirilebilir. Örneğin bir operatör, tablet arayüzünden robotun görmediği meyveleri işaretleyerek robotu yönlendirebilir veya robot toplarken eşzamanlı manuel toplama ile işbirlikçi bir düzen kurulabilir. Ancak uzun vadede hedef, bu sistemlerin tam otonom çalışmasıdır. Bu amaçla, tarımsal üretim süreçlerinin bütüncül bir otomasyon içinde düşünülmesi gerekir. Otonom hasat robotları, insansız kara araçları veya insansız hava araçları ile entegre edilerek tarlada/serada dolaşım, lojistik ve hasat sonrası taşıma işlemlerini de kapsayan bir ekosistemin parçası haline gelebilir.

Öngörülmektedir ki önümüzdeki 5-10 yılda otonom hasat robotları belirli ürünlerde pilot kullanım aşamasından çıkarak ticari anlamda kullanılmaya başlanacaktır. Bu süre zarfında hem algoritmik iyileştirmeler hem de mekatronik tasarım optimizasyonları devam edecektir. Bir üründe kazanılan deneyimler, benzer özellikteki başka ürünlere de aktarılabilir. Nitekim elma, domates, biber gibi başka ürünlerde de YOLO tabanlı hasat robotu denemeleri mevcuttur ve her biri kendi zorluklarına özgü çözümler geliştirmiştir (Tian ve ark., 2019; Parsa ve ark., 2023). Bu kolektif ilerleme, tarımda dijital dönüşümü hızlandırarak verimlilik, sürdürülebilirlik ve iş güvenliği konularında önemli pozitif etkiler yaratacaktır. Sonuç itibarıyla, otonom çilek hasat sistemlerinin teknik olarak uygulanabilirliği büyük ölçüde kanıtlanmıştır; ancak optimizasyon ve adaptasyon ihtiyacı sürmektedir. Görüntü işleme alanında daha hızlı ve çevik algoritmalar, robotik alanda daha akıllı kontrol stratejileri (ör. yapay zekâ destekli yol planlama, çok robotun koordinasyonu) devreye girdikçe bu sistemlerin etkinliği daha da artacaktır. Tarımsal üretim yöntemlerinin de bu teknolojilere uyum sağlayacak şekilde evrilmesiyle birlikte, tam otonom hasat robotlarının tarım sektöründe yaygınlaşması beklenmektedir. Bu da tarımsal üretimde verimlilik artışı, maliyet optimizasyonu ve çalışanların iş yükünün azalması anlamına gelecektir.

KAYNAKÇA

- Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>
- Chang, C.-L., & Huang, C.-C. (2024). Design and implementation of an AI-based robotic arm for strawberry harvesting. *Agriculture*, 14(11), 2057. <https://doi.org/10.3390/agriculture14112057>
- Chen, Y., Xu, H., Chang, P., Huang, Y., Zhong, F., Jia, Q., Chen, L., Zhong, H., & Liu, S. (2024). CES-YOLOv8: Strawberry maturity detection based on the improved YOLOv8. *Agronomy*, 14(7), 1353. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071353>
- Dai, S., Bai, T., & Zhao, Y. (2025). Keypoint detection and 3D localization method for ridge-cultivated strawberry harvesting robots. *Agriculture*, 15(4), 372. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040372>
- Feng, Q., Zou, W., Fan, P., Zhang, C., & Wang, X. (2018). Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 96-100. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2853>
- Ge, Y., Xiong, Y., & From, P. J. (2019). Instance segmentation and localization of strawberries in farm conditions for automatic fruit harvesting. *IFAC-PapersOnLine*, 52(30), 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.537>
- Han, C., Lv, J., Dong, C., Li, J., Luo, Y., Wu, W., & Abdeen, M. A. (2024). Classification, advanced technologies, and typical applications of end-effectors for fruit and vegetable picking robots. *Agriculture*, 14(6), 1310. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081310>
- Hayashi, S., Shigematsu, K., Yamamoto, S., Kobayashi, K., Kohno, Y., Kamata, J., & Kurita, M. (2010). Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test. *Biosystems Engineering*, 105(2), 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.011>
- He, L., Wu, D., Zheng, X., Xu, F., Lin, S., Wang, S., Ni, F., & Zheng, F. (2025). RLK-YOLOv8: Multi-stage detection of strawberry fruits throughout the full growth cycle in greenhouses based on large kernel convolutions and

- improved YOLOv8. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1552553. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1552553>
- He, Z., Karkee, M., & Zhang, Q. (2022). Detecting and localizing strawberry centers for robotic harvesting in field environment. *IFAC-PapersOnLine*, 55(9), 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.110>
- Helmi, A., Behfar, H., & Soheili, S. (2023). Online detection of tomatoes for robotic harvesting. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 2(2), 130–142. <https://doi.org/10.22103/BBR.2023.22393.1064>
- Kondo, N., Monta, M., & Fujiura, T. (1996). Fruit harvesting robots in Japan. *Advances in Space Research*, 18(1–2), 181–184. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00806-P](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00806-P)
- Parsa, S., Debnath, B., & Khan, M. A. (2023). Autonomous strawberry picking robotic system (Robofruit). *Journal of Field Robotics*, 40(8), 1352–1376. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.03947>
- Pérez-Borrero, I., Marin-Santos, D., Vasallo-Vázquez, M. J., & Gegúndez-Arias, M. E. (2021). A new deep-learning strawberry instance segmentation methodology based on a fully convolutional neural network. *Neural Computing and Applications*, 33(22), 15059–15071. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06131-2>
- Russo, M., Ceccarelli, M., Corves, B., Hüsing, M., Lorenz, M., Cafolla, D., & Carbone, G. (2017). Design and test of a gripper prototype for horticulture products. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 44, 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.09.005>
- Sun, T., Zhang, W., Miao, Z., Zhang, Z., & Li, N. (2023). Object localization methodology in occluded agricultural environments through deep learning and active sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108141>
- Tian, Y., Yang, G., Wang, Z., Wang, H., Li, E., & Liang, Z. (2019). Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 417–426. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.012>
- Wang, X., Wu, Z., Jia, M., Xu, T., Pan, C., Qi, X., & Zhao, M. (2023). Lightweight SM-YOLOv5 tomato fruit detection algorithm for plant factory. *Sensors*, 23(6), 3336. <https://doi.org/10.3390/s23063336>

- Xia, C. (2024). Rapid strawberry ripeness detection and 3D localization of picking point based on improved YOLOv8-Pose with RGB-D camera. *Journal of Electrical Systems*, 20(3_s), 2171–2181. <https://doi.org/10.52783/jes.1840>
- Yamamoto, S., Hayashi, S., Yoshida, H., & Kobayashi, K. (2014). Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 48(3), 261-269. <https://doi.org/10.6090/jarq.48.261>
- Yu, Y., Xie, H., Zhang, K., Wang, Y., Li, Y., Zhou, J., & Xu, L. (2024). Design, development, integration, and field evaluation of a ridge planting strawberry harvesting robot. *Agriculture*, 14(12), 2126. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122126>
- Zhang, B., Xie, Y., Zhou, J., Wang, K., & Zhang, Z. (2020). State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105694. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694>

BÖLÜM 4

AKILLI TARIMDA YABANCI OTLARIN ALGILANMASI VE KONTROLÜ: YAPAY ZEKÂNIN ROLÜ

Arş. Gör. Özlem BAHAR¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18074295>

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Kırşehir, Türkiye.
ozlem.bahar@ahievran.edu.tr, orcid id: 0009-0002-2246-8790

1. GİRİŞ

Yabancı otlar, çiftçiler tarafından ekilmeyen ve buldukları alanlarda ekonomik ve ekolojik zararlara yol açan istenmeyen bitkilerdir. Kültür bitkileriyle su, besin maddesi ve güneş ışığı gibi yaşamsal kaynaklar için rekabete girerek tarımsal ürünlerin verimini ve kalitesini düşürebilirler (Sırrı ve ark., 2023). Yapılan araştırmalara göre yabancı otların neden olduğu verim kaybı, bitki türü ile çevresel koşullara bağlı olarak %10 ile %80 arasında değişebilmekte; etkin mücadele yapılmadığında bu oran çok daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir (Oerke, 2006; Pätzold ve ark., 2020). Ayrıca bazı yabancı otlar, zehirli bileşikleriyle gıda ve yem ürünlerine karışarak insan ve hayvan sağlığını tehdit edebilmekte; çiftlik hayvanlarında üreme, et ve süt verimini olumsuz etkileyebilmektedir (Kounalakis ve ark., 2016; Önen, 2021). Bu nedenlerle, tarımsal ekosistemde yabancı ot kontrolü sürdürülebilir ve başarılı üretim için vazgeçilmez bir faaliyet olarak kabul edilmektedir.

Geçmişten günümüze yabancı otlarla mücadele için mekanik yöntemlerden kimyasal herbisit kullanımına dek çeşitli stratejiler uygulanmıştır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren tarımda herbisit adı verilen kimyasal yabancı ot öldürücülerinin keşfi ve Yeşil Devrim ile birlikte yabancı ot mücadelesi büyük ölçüde kimyasal ilaçlara dayanır hale gelmiştir. Her sorunlu yabancı ot türüne karşı etkili bir kimyasal molekül geliştirilmiş; bu sayede başlangıçta verim kayıplarını azaltmada başarı sağlanmıştır. Ne var ki, yoğun herbisit kullanımı zamanla hedef dışı organizmaların zarar görmesi, toprak ve su kirliliği, gıdalarda zararlı kalıntılar ve yabancı otlarda herbisit dirençli biyotiplerin ortaya çıkması gibi ciddi çevre ve sağlık sorunlarını beraberinde getirmiştir (Bohra ve ark., 2015; Ergün ve ark., 2025; Ghatrehsamani ve ark., 2023). Günümüzde herbisitler hâlâ dünya genelinde en yaygın kullanılan yabancı ot kontrol yöntemi olsa da, bu olumsuz etkiler ve sürdürülebilirlik kaygıları nedeniyle daha çevreci ve yenilikçi alternatiflere ihtiyaç duyulmaktadır (Sırrı ve ark., 2023). Bu bağlamda entegre mücadele yaklaşımları önem kazanmış; mekanik, biyolojik ve kimyasal yöntemlerin duruma göre bir arada kullanıldığı bütüncül stratejiler önerilmiştir (Hu ve ark., 2024; Bohra ve ark., 2025)

Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler, tarım sektöründe de yenilikçi çözümlerin doğmasına zemin hazırlamıştır. Özellikle sayısal teknoloji ve

otomasyon alanlarındaki ilerlemeler, hassas tarım kavramını ortaya çıkarmış ve tarımsal üretimde veri ve yapay zekâ destekli karar verme imkânlarını artırmıştır. Son yıllarda yabancı ot kontrolünde de elektronik sensörler, görüntü işleme teknikleri ve robotik sistemler entegre edilerek daha hedefe yönelik ve sürdürülebilir mücadele yöntemleri geliştirilmektedir. Üretimde yüksek iş gücü ve maliyet gerektiren yabancı ot temizliği için geliştirilen yeni tekniklerden biri, yapay zekâ tabanlı otonom sistemler kullanılmasıdır (Sırrı ve ark., 2023). Bu kapsamda tarlalarda otonom robotların yabancı ot mücadelesinde kullanılması hem herbisit tüketimini hem de insan iş gücüne duyulan ihtiyacı azaltarak çevresel ve ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır (Özgür ve Nar, 2019). Nitekim yapay zekâ destekli robotik yabancı ot kontrolü, toprağı daha az işleyerek erozyonu azaltmakta, herbisit uygulamasını yalnızca gerekli noktalara indirgediğı için hem maliyetleri düşürmekte hem de tarımsal üretimde sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır (Padhi ve ark., 2024). Geliştirilen insansız kara ve hava araçları ile tarla koşullarında insan müdahalesine gerek kalmaksızın yabancı otların algılanması ve yok edilmesi mümkün hale gelmektedir (Qu ve Su, 2024; Jhala ve ark., 2014; Shen ve ark., 2025).

2. YABANCI OTLARIN ALGILANMASINDA YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİ

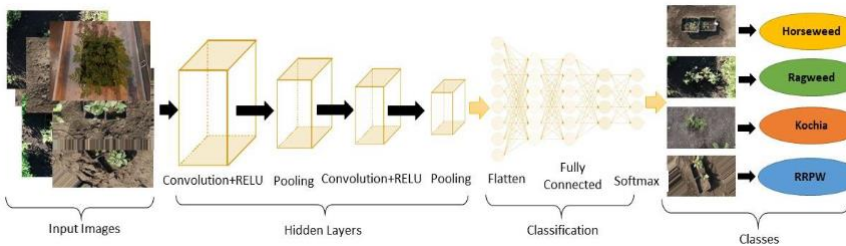
Otonom yabancı ot algılama sistemlerinin çoğı, makine görüşü (bilgisayarlı görü) tekniklerini kullanarak çalışır. Kamera veya benzeri optik sensörlerle tarla görüntüleri toplanır ve yazılımlar aracılığıyla bu görüntülerdeki yabancı otlar tespit edilir. İlk dönem çalışmalar, bitki ve toprak arasındaki spektral yansımaya dayalı yöntemlerle yabancı otları belirlemeye odaklanmıştır. Bitkiler görünür tayfin yeşil bölgesinde diğer yüzeylere göre daha yüksek, kırmızıdan itibaren NIR (yakın kızılötesi) bölgesinde ise dramatik bir şekilde artan yansıtma özelliğine sahiptir. Buna karşılık toprak, görünür ve NIR dalga boylarında genel olarak düşük ve düz bir yansıtma eğrisi gösterir (Steward ve ark., 2019). Bu prensipten yararlanan erken dönem sistemlerde renk kameralarından elde edilen görüntülerde her pikselin kırmızı, yeşil, mavi (RGB) ışık yoğunlukları veya NIR bandındaki yansıtma değerleri kullanılarak, bitki ve toprak piksellerinin sınıflandırılması hedeflenmiştir. Örneğın Excess Green (Aşırı Yeşil) indeksi veya HSV renk uzayındaki ton değeri gibi basit renk formülleri bitki piksellerini arka plandan

ayırt etmek için kullanılmış; benzer şekilde NDVI (Normalize Edilmiş Vejetasyon İndeksi) gibi görünür ve NIR bant kombinasyonlarına dayalı vejetasyon indeksleri ile toprağa karşı bitki alanlarının belirlenmesi sağlanmıştır (Steward ve ark., 2019). Renk ve kızılötesi yansıma tabanlı bu erken teknikler, görüntü üzerinde bitki varlığını oldukça güvenilir biçimde saptayabilmektedir. Ancak sadece birkaç spektral kanal bilgisinin kullanılması, farklı bitki türlerini birbirinden ayırt etmeyi zorlaştırmıştır; zira çoğu tarımsal ürün ve yabancı ot benzer spektral özellikler taşıyabilmektedir (Slaughter ve ark., 2008). Bu sorunu aşmak üzere daha yüksek spektral çözünürlüğe sahip hiperspektral görüntüleme teknikleri araştırılmış ve çok sayıda dar bantta yansıma verisi kullanılarak bitki türlerinin daha yüksek doğrulukla tanınabildiği gösterilmiştir (Slaughter ve ark., 2008; Steward ve ark., 2019; Yaseen ve Long, 2024).

Spektral yöntemlerin sınırlamalarına paralel olarak, bitkilerin morfolojik özelliklerine dayalı tanıma yöntemleri de geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, bitkilerin yaprak şekli, yaprakların veya bitki tepesinin iki boyutlu görüntüdeki silueti ya da üç boyutlu yapısı gibi biyolojik morfoloji karakteristikleri kullanılarak, yabancı ot ile kültür bitkisi ayrımı yapılmaya çalışılır. Özellikle sıra aralarında hedefli ilaçlama veya mekanik temizleme yapabilmek için, bitkilerin konumunu ve türünü belirlemede bu tür şekil tanıma algoritmaları uygulanmıştır (Steward ve ark., 2019). Örneğin, bitki tepe tacının genişliği, yaprakların kenar girintileri, yaprak sayısı gibi özellikler bazı yabancı ot türleri için ayırt edici olabilir. Üç boyutlu lazer tarayıcılar veya stereo kameralar kullanılarak elde edilen 3B nokta bulutu verisinden çıkarılan şekil özelliklerinin, aydınlatma değişimleri ve gölge etkilerine karşı daha dayanıklı olduğu ve sadece renk temelli yöntemlere kıyasla tanıma performansını artırdığı görülmüştür (Xu ve ark., 2021; Xu ve ark., 2018). Bununla birlikte, bitkilerin yaprak ve gövde şekilleri son derece karmaşık ve değişkendir; farklı türleri güvenilir biçimde ayırabilecek etkili ve sağlam şekil betimleyicileri tasarlamak önemli bir araştırma zorluğu olmaya devam etmektedir. Ayrıca yaprakların üst üste binmesi, arka plan karmaşıklığı gibi faktörler şekil tabanlı algoritmaların hata yapmasına yol açabilir (Slaughter ve ark., 2008; Steward ve ark., 2019).

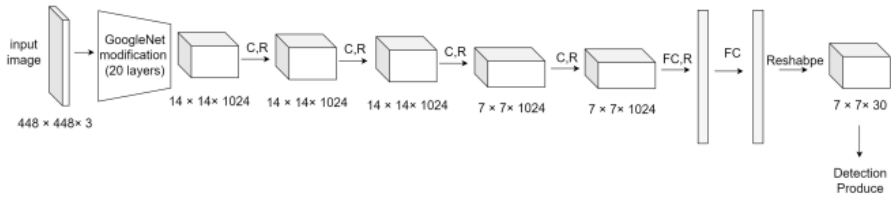
Son dönemde, bilgisayarlı görü alanındaki en büyük atılım derin öğrenme tekniklerinin tarımsal uygulamalara uyarlanmasıyla gerçekleşmiştir.

Özellikle Evrişimli Sinir Ağları (CNN) mimarisine sahip derin öğrenme modelleri, görüntülerden karmaşık desenleri öğrenerek nesne tanıma problemlerinde çığır açıcı başarılar elde etmiştir (Şekil 1). Tarımsal yabancı ot algılama konusunda da derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, klasik yöntemlere göre belirgin üstünlükler göstermektedir. Nitekim literatürde son on yılda derin sinir ağları kullanılarak yabancı otların yüksek doğrulukla tanındığı çok sayıda çalışma yayınlanmıştır (Azghadi ve ark., 2024). Bu çalışmalar kapsamında, yeşil-üzerinde-yeşil algılama adı verilen zorlu senaryolarda dahi yapay zekâ ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yeşil-üzerinde-yeşil durum, büyüme dönemindeki ürün bitkileri arasından yabancı otların seçilmesini ifade eder ve benzer renk tonlarındaki bitkileri ayırt etmeyi gerektirir. Geleneksel optik sensörlerin bir kısmı (örneğin sadece bitki varlığına duyarlı NIR sensörleri) bu ayrımı yapamazken, derin öğrenme tabanlı görüntü tanıma algoritmaları yaprak şekli, damarlanma deseni, doku gibi ince ayrıntıları değerlendirerek kültür bitkisi ve yabancı ot ayrımını mümkün kılmaktadır. Örneğin klasik bir yeşil üzerinde kahverengi algılama sistemi olan WeedSeeker, bitkilerin fotosentez sırasında yaydığı kızılötesi ışığı algılayarak çalışır ve önüne gelen tüm yeşil hedeflere ilacı püskürtür; bu nedenle ekili tarla içinde kullanıldığında ürünle otu ayıramadığı için ancak arız ya da nadas alanlarında etkili olabilir (Azghadi ve ark., 2024; Hu ve ark., 2024). Buna karşılık, modern görüntü tanıma sistemleri kamera ile alınan RGB görüntüler üzerinde çalışarak aynı karenin içinde hem ürün hem yabancı ot olsa bile ayırt edebilecek şekilde eğitilmektedir. Derin öğrenme yöntemleri, denetimli öğrenme yaklaşımıyla çok sayıda örnek görüntü üzerinden eğitilerek, insan uzmanların etiketlediği yabancı ot ve kültür bitkisi görsellerinden ortak özellikleri öğrenir ve yeni görüntülerde benzer desenleri tespit ederek sınıflandırma yapar.



Şekil 1: Evrişimsel sinir ağlarının genel mimarisi (Ergün ve ark., 2025)

Güncel yapay zekâ tabanlı yabancı ot algılama çalışmalarında öne çıkan birkaç model bulunmaktadır. Bunlardan biri, nesne tespitinde yaygın olarak kullanılan YOLO (You Only Look Once) algoritmasıdır. YOLO, görüntüdeki nesnelere gerçek zamanlı olarak tespit edip sınıflandırabilen bir derin öğrenme modelidir ve tarla koşullarında yabancı otları çabuk ve yüksek doğrulukla belirleyebilmesi sayesinde tarımsal uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Nitekim yapılan bir derleme çalışmasında, YOLO tabanlı yabancı ot tespit sistemlerinin özellikle hızlı çalışırken doğruluktan da çok az ödün verdiği belirtilmiştir (Wang ve ark., 2025). Benzer şekilde, Faster R-CNN gibi bölge tabanlı evrimsel ağ modelleri de yabancı otların konumunu ve türünü belirlemede kullanılmakta; bu modeller genellikle daha yüksek doğruluk sağlamakla birlikte gerçek zamanlı uygulamalarda YOLO kadar hızlı olmayabilmektedir. Görüntüdeki yabancı otların sadece sınıfını değil, piksel düzeyinde konumunu da belirlemek için segmantasyon (bölütleme) yaklaşımları kullanılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2: YOLO algoritmasının iş akışı (Wang ve ark., 2025)

Örneğin Mask R-CNN modeliyle bir görüntüdeki her bir yabancı ot bireyi pikseller bazında ayrıştırılıp tespit edilebilmekte, böylece ilacın veya fiziksel mücadelenin tam hedefe uygulanması mümkün olmaktadır. Bir vakada, Mask R-CNN ile tespit edilen yabancı otlar, VGG16 tabanlı bir sınıflandırma ağı ile doğrulandıktan sonra, otonom robot üzerindeki delta manipülatör kola bağlı yüksek hızlı döner bıçak ile fiziksel olarak kesilmiştir. Bu sistemde yabancı otları tanıyıp imha etme işleminin %99.5 gibi oldukça yüksek bir başarı oranıyla gerçekleştiği rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2025; Tripathi ve ark., 2025). Derin öğrenmenin sunduğu bu yüksek doğruluk potansiyeli sayesinde, gelecekte tarla içinde her bir yabancı ota ayrı muamele yapabilen ve minimum hata ile çalışan otonom araçların yaygınlaşması beklenmektedir.

3. OTONOM MÜCADELE MEKANİZMALARI VE ROBOTİK SİSTEMLER

Yapay zekâ yardımıyla yabancı otun tespiti yapıldıktan sonra, sıradaki adım uygun mücadele yönteminin uygulanmasıdır. Geleneksel tarımda olduğu gibi, otonom sistemler de farklı mücadele tekniklerini kullanarak yabancı otları etkisiz hale getirebilir. Bunlardan en sık uygulananları kimyasal, mekanik ve termal yöntemler olarak özetlenebilir.

Otonom sistem, algıladığı yabancı otların konumuna ve büyüklüğüne göre, sadece hedef bölgeye sınırlı miktarda herbisit uygulayabilir. Bu sayede tüm alana geliş güzel ilaç atılmasının önüne geçilerek kimyasal kullanımının yüzde 20-90'a varan oranlarda azaltılması mümkün olmaktadır (Steward ve ark., 2019). Örneğin tarla içinde gezinen akıllı bir ilaçlama robotu, kameraları aracılığıyla tespit ettiği yabancı otun üzerine nokta atışı yaparak birkaç damla herbisit püskürtür ve hemen yoluna devam eder. İsviçre'de geliştirilen EcoRobotix adlı güneş enerjili otonom robot bu yaklaşımı başarıyla gerçekleştiren bir prototiptir. EcoRobotix, 3 metre genişliğinde bir büyük oktagonal platform üzerinde hareket eden, GPS ile konumlanan bir robot olup alt kısmındaki kameralarla sürekli tarama yapmaktadır. Görüntü işleme algoritmaları bir yabancı ot saptadığında, robotun üzerinde bulunan iki adet robot kolu hedefin üzerine doğru uzanmakta ve sadece o noktaya herbisit damlatarak yabancı otu öldürmektedir (Steward ve ark., 2019, Şekil 3). Bu sistem, güneş panelleri ile kendi enerjisini üretebildiği ve herbisiti çok düşük dozlarda kullandığı için hem ekonomik hem de çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.



Şekil 3: EcoRobotix robotunun genel görünümü (Steward ve ark., 2019)

Benzer şekilde, traktöre monte edilebilen akıllı ilaçlama sistemleri de geliştirilmiştir: Örneğin ABD'de Blue River şirketinin geliştirdiği ve daha

sonra büyük tarım ekipmanları üreticilerince benimsenen “See & Spray” teknolojisi, kameralarla algıladığı her bir yabancı otun üzerine ayrı ayrı ilaç püskürten ve tarla genelinde %80'lere varan kimyasal tasarrufu sağlayan bir sistemdir. Bu tür seçici ilaçlama teknolojileri, yabancı ot yoğunluğu düşük olan geniş alanlarda özellikle etkilidir; zira sadece gerekli noktalara ilaç atarak hem ekonomik kazanç sağlamakta hem de ürün üzerine kimyasal temasını en aza indirmektedir.



Şekil 4: See & Spray'in genel görünümü

Bazı otonom robotlar, yabancı otları fiziksel olarak çıkarmak veya tahrip etmek üzere tasarlanmıştır. Bu yöntem, özellikle organik tarım gibi kimyasal kullanmanın istenmediği durumlarda büyük önem taşır. Mekanik çapalama robotları, sıra aralarına girip tespit ettikleri yabancı otları küçük çapa kollarıyla kökünden sökebilir veya toprağa gömebilir. Örneğin geliştirilen bir prototip robot, sıra üzerinde algıladığı yabancı otlara konumlanarak küçük bıçak mekanizmalarıyla otları kesip koparmaktadır (Chalingaryam ve ark., 2018; Sırrı ve ark., 2023). Benzer şekilde, yukarıda bahsedilen döner bıçaklı sistemler de mekanik yöntem girer; yüksek devirli döner disk veya ip benzeri kesiciler yabancı ot gövdesini parçalayarak etkisiz hale getirir (Wang ve ark., 2025). Alevle yakma da otonom sistemlere entegre edilen bir diğer fiziksel mücadele tekniğidir: Robot, tespit ettiği yabancı otun üzerine kontrollü bir propan alevi tutarak bitki dokusunu öldürür. Bu yöntem de organik tarımda kimyasalsız çözüm olarak denenmektedir ancak kuru koşullarda yangın riski gibi dezavantajları vardır.

En yeni ve yenilikçi yaklaşımlardan biri, yüksek güçlü lazer ışınları kullanarak yabancı otların yakılmasıdır. Lazerli yabancı ot kontrolü, milimetre

mertebesinde hassasiyetle hedeflenen yabancı otun üzerine odaklanmış bir lazer demeti göndererek bitkinin hücrelerini tahrip etmeye dayanır. Bu sayede toprağa veya çevreye temas olmadan, sadece istenmeyen bitki yok edilir. Lazer teknolojisi son yıllarda yapay zekâ ile birleştirilerek tarım robotlarına entegre edilmektedir. Avrupa Birliği destekli WeLASER projesi, kendinden yürür otonom bir lazerli mücadele aracı geliştirmekte ve yaşam döngüsü değerlendirmelerine göre çevresel performansı yüksek bir alternatif sunmaktadır (Wang ve ark., 2025, Şekil 5). Lazerli sistemlerin avantajı, kimyasal kullanmaması ve toprağı rahatsız etmemesidir; dezavantajı ise yüksek enerji ihtiyacı ve işlem süresinin nispeten yavaş olmasıdır. Bununla birlikte, derin öğrenme ile desteklenmiş akıllı lazer robotlarının tarla koşullarında başarılı olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Wang ve ark. (2025) derlemesinde, lazerle yakma yönteminin geleneksel yöntemlerin birçok sakıncasını giderebilecek etkili bir çözüm olduğu vurgulanmakta ve bu alandaki akademik ve endüstriyel ilginin giderek arttığı belirtilmektedir.



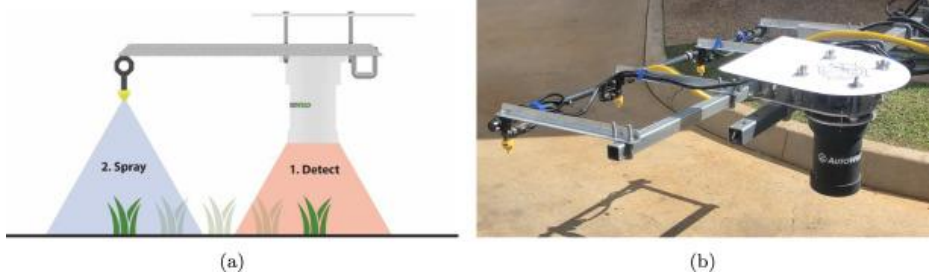
Şekil 5: WeLASER'in genel görünümü (Emmi ve ark., 2023)

İnsansız hava araçları (İHA, drone) tarımda devrim niteliğinde yenilikler arasında yer almaktadır ve yabancı ot kontrolünde de çeşitli şekillerde kullanılabilir. İHA'lar hem havadan görüntüleme yoluyla yabancı ot haritalarının çıkarılmasında, hem de havadan hedefe ilaç uygulama amacıyla yaygınlaşan araçlardır (Azghadi ve ark., 2024). Örneğin bir İHA, tarlayı otonom olarak tarayarak yüksek çözünürlüklü görüntüler toplayabilir; yapay zekâ analizleri sonucunda yabancı ot yoğunluğunun yüksek olduğu noktalar coğrafi koordinatlarıyla belirlenebilir. Bu bilgiler ışığında İHA veya yere monte başka sistemler yalnızca belirlenen noktalara herbisit uygular. Çin'de yapılan geniş ölçekli bir araştırma, pestisit uygulamalarında İHA kullanımının çiftçilere

önemli ekonomik ve zaman avantajları sağladığını göstermiştir. İHA kullanan çiftçilerin hektar başına gelirlerinin yaklaşık 434–488 ABD doları arttığı, ayrıca pestisit uygulamasına harcanan sürenin hektar başına 14–16 saat azaldığı hesaplanmıştır (Quan ve ark., 2023). İHA'ların tarımsal ilaçlamada günde 20–33 hektarı bulabilen alanları kaplayabildiği, bu hızın elle uygulamadan 30-60 kat daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2025; Quan ve ark., 2023). Buna ek olarak, hassas yükseklik ve hız kontrolü sayesinde İHA'lar ilaçlamayı daha homojen yapabilmekte ve aşırı ilaç kullanımını azaltabilmektedir (Chlingaryan ve ark., 2018). Ancak İHA ile ilaçlamanın bazı dezavantajları da vardır: Püskürtme sırasında rotorların oluşturduğu güçlü hava akımı, ilacın hedef dışı alanlara sürüklenmesine (drift) yol açabilmekte, bu da çevre ve insan sağlığı açısından risk teşkil etmektedir (Quan ve ark., 2023). Bu nedenle Avrupa'nın birçok ülkesinde insansız hava araçlarıyla zirai ilaç uygulamasına sıkı kısıtlamalar getirilmiştir; Çin gibi ülkelerde ise eğitimli ve lisanslı pilotlar eliyle belirli standartlara uyularak yapılması koşuluyla İHA ilaçlamasına izin verilmektedir (Wang ve ark., 2025; Quan ve ark., 2023).

Yukarıda özetlenen algılama ve kontrol yaklaşımları bir araya getirilerek değişik otonom yabancı ot mücadelesi sistemleri geliştirilmektedir. Bu sistemler insansız kara aracı (UGV), insansız hava aracı (UAV) veya traktöre entegre akıllı ekipman formunda olabilir. Örneğin, AutoWeed sistemi, traktörün arkasına takılan ve şeker kamışı tarlalarında denenmiş bir derin öğrenme destekli noktaya ilaçlama düzenidir (Şekil 6). AutoWeed, üzerinde bulunan RGB kameralar ile sırayı tarayarak hem ürün fidanlarını hem de yabancı otları gerçek zamanlı tanır. Yazılım altyapısı, yeşil-üzerinde-yeşil ayırım yapabilen gelişmiş bir CNN modeline dayanmaktadır. Sistem, algıladığı her yabancı otun konumuna hızla tepki verip yalnızca o bitkiye yönelik herbisit püskürtür. Avustralya'da 25 hektar alanda yürütülen saha denemelerinde, AutoWeed'in genel (blanket) ilaçlama kadar (%97 oranında) etkili yabancı ot kontrolü sağladığı, buna karşılık toplam herbisit kullanımını ortalama %35 azalttığı tespit edilmiştir. Özellikle yabancı ot yoğunluğunun düşük olduğu bazı şeritlerde nokta ilaçlama sayesinde kimyasal kullanımında %65'e varan tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca ilaçlamadan sonraki 3-6 gün içinde yapılan ölçümlerde, sulama suyu akıntılarındaki herbisit derişimi ve yükünün geleneksel yöntemle kıyasla sırasıyla %39 ve %54 oranlarında daha düşük olduğu rapor edilmiştir (Azghadi ve ark., 2024). Bu sonuçlar, yapay zekâ

destekli hassas püskürtme teknolojisinin, yabancı ot kontrol etkinliğini koruyarak önemli çevresel faydalar (örneğin su kalitesinde iyileşme) sağlayabildiğini göstermektedir.



Şekil 6: AutoWeed sisteminin bir görseli (Azghadi ve ark., 2025)

Diğer bir uygulama örneği, önceki bölümde bahsedilen lazerli mücadele konseptinin pratikte test edilmesidir. Örneğin Avrupa’da tarla koşullarında deneme yapılan bir prototip lazer robot, kameralar ve derin öğrenme yazılımı ile sıra üzerindeki yabancı otları tanımladıktan sonra her birinin üzerine 1–2 saniye süreyle yüksek güçlü lazer atımları göndermiş ve yabancı otların birkaçı dışında tamamını başarıyla kurutarak yok etmiştir (Wang ve ark., 2025). Bu prototip, henüz ticari ürün haline gelmemiş olsa da WeLASER gibi projelerin önünü açan önemli bir gösterge olmuştur.

Öte yandan, tam otonom kara robotlarının yanı sıra, yarı otonom sistemlerin de pratikte kullanımı artmaktadır. Örneğin kameralı ilaçlama traktörleri, sürücü yönetiminde tarlada ilerlerken üzerlerindeki yapay zekâ sistemi sayesinde ilaçlama memelerini otomatik açıp kapatarak sadece yabancı ot görülen noktaları ilaçlamaktadır. Bu tip akıllı ilaçlama bomları, halihazırda ticari olarak satışa sunulmuş ve çiftçiler tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Trimble firmasının WeedSeeker 2 sistemi veya Bilberry şirketinin kameralı nokta ilaçlama kiti buna örnek verilebilir. Bu sistemler sayesinde üreticiler, mevcut ilaçlama ekipmanlarını yapay zekâ tabanlı algılayıcılarla donatarak %80'lere varan ilaç tasarrufu ve önemli zaman kazancı elde ettiklerini bildirmektedir (Azghadi ve ark., 2024).

4. KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

Yapay zekâ modellerinin etkinliği büyük ölçüde kullanılan eğitim verisinin çeşitliliği ve kalitesi ile doğru orantılıdır. Tarımda her bölgenin toprak

tipi, iklimi, yetişen ürünleri ve karşılaşılan yabancı ot türleri farklıdır. Ancak mevcut yapay zekâ uygulamalarının çoğunda kullanılan veri setleri, genellikle büyük ölçekli endüstriyel çiftliklerden derlenmiştir. Bu durum, küçük ve farklı koşullara sahip çiftlikleri temsil etmede yetersiz kalmakta, algoritmaların genellenabilirliğini sınırlamaktadır (Atapattu ve ark., 2024). Sonuç olarak, yapay zekâ modeli kendi görmediği veya az gördüğü bir yabancı ot türü ya da farklı bir tarla şartıyla karşılaştığında tanıma başarı oranı düşebilmektedir. Bu veri önyargısı sorunu, küçük ölçekli veya marjinal koşullardaki işletmelerin yapay zekâ destekli teknolojilerden yeterince faydalanamamasına yol açabilir. Ayrıca, derin öğrenme modellerinin eğitimi için gereken verilerin toplanması, etiketlenmesi ve sürekli güncellenmesi de büyük emek ve maliyet gerektirmektedir. Bu nedenle, akademik araştırmalar ve özel sektör projeleri çoğunlukla sınırlı sayıda senaryoya odaklanabilmekte, farklı coğrafi bölgeler ve mahsul-yabancı ot kombinasyonları için geniş kapsamlı veri setlerinin oluşturulması zor olmaktadır.

Yapay zekâ tabanlı sistemlerin kırsal alanlarda uygulanması, gelişmiş altyapı gereksinimleri nedeniyle güçleşmektedir. Örneğin, gerçek zamanlı veri işleme ve model çalıştırma için genellikle yüksek hızlı internet bağlantısı ve güvenilir elektrik kaynağı gerekir. Oysa birçok tarım bölgesinde geniş bant internet erişimi sınırlıdır ve elektrik altyapısı kesintilere açıktır (Atapattu ve ark., 2024). Bu da, bulut tabanlı çalışan ya da sürekli uzaktan güncelleme gerektiren yapay zekâ sistemlerinin sahada kullanımını zorlaştırmaktadır. Donanım açısından bakıldığında, otonom robotlar, gelişmiş sensörler ve GPS, RTK gibi konumlama cihazları yüksek maliyetli teknolojilerdir. Küçük çiftçiler için İHA, robot traktör, hassas püskürtme sistemi gibi ekipmanlara yatırım yapmak ekonomik olarak mümkün olmayabilir. Ayrıca bu cihazların zorlu tarla koşullarında çalışırken maruz kalacakları toz, çamur, titreşim gibi etkenlere dayanıklı olması gerekir. Bakım ve onarım ihtiyaçları da göz önüne alındığında, gelişmiş robotik sistemlerin çiftçiler tarafından sürekli işletilebilmesi için güvenilirliklerinin ispatlanması ve teknik destek ağının oluşturulması şarttır. Aksi takdirde, arızalanan veya bozulan pahalı bir sistem üreticiye fayda sağlamak yerine ek maliyet kalemi haline gelebilir.

İleri teknolojilerin tarıma entegrasyonunda yüksek başlangıç maliyetleri önemli bir bariyerdir. Gelişmiş yapay zekâ modellerini eğitmek için büyük ve çeşitli veri kümelerinin toplanması, bu verilerin depolanması ve işlenmesi,

tarlaya sensör ağları veya otonom cihazlar yerleştirilmesi büyük sermaye gerektirir (Tripathi ve ark., 2025; Shen ve ark., 2025). Örneğin, farklı bölgelerdeki yabancı otları kapsayan milyonlarca görüntünün etiketlenmesi kamu kurumları veya şirketler için ciddi bir yatırımdır. Benzer şekilde, dronelar, kamera donanımlı robotlar, otonom traktörler gibi ekipmanların temini de küçük aile işletmelerinin bütçesini aşabilir. Yüksek teknoloji sektöründe çalışacak kalifiye personelin azlığı ve buna bağlı yüksek ücretler de bu sistemlerin geliştirme maliyetini artırmaktadır (Atapattu ve ark., 2024). Tarım sektörü, finansal getiri bakımından teknoloji sektörüne kıyasla daha düşük marjlı olduğundan, yetenekli yapay zekâ uzmanlarını bu alanda çalışmaya çekmek zor olabilmektedir. Dolayısıyla, tarım teknolojileri girişimleri genellikle büyük şirketlerin veya kamu destek programlarının finansmanına ihtiyaç duymaktadır. Aksi halde, geliştirilen prototiplerin piyasaya uygun maliyetlerle sunulması mümkün olamayabilir.

Tüm bu zorluklar, yapay zekâ destekli yabancı ot mücadelesinin henüz yaygın ticarileşme aşamasına geçememesine neden olmaktadır. Nitekim günümüzde tarla koşullarında düzenli kullanıma geçmiş, yaygın olarak pazarlanan tam otonom bir yabancı ot kontrol robotu bulunmamaktadır (Sırrı ve ark., 2023). Mevcut sistemlerin çoğu ya prototip aşamasındadır ya da belirli pilot bölgelerde deneme amaçlı uygulanmaktadır. Bununla birlikte, yukarıda tartışılan engellerin aşılması yönünde hem araştırma camiasında hem de endüstri tarafında yoğun çaba harcanmaktadır. Bir sonraki bölümde, yapay zekâ destekli yabancı ot kontrolünün geleceği ve bu alanda beklenen gelişmeler değerlendirilecektir.

5. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Yapay zekâ modellerinin başarısı büyük ölçüde veri kalitesine bağlıdır. Gelecekte daha zengin ve çeşitli veri kümeleri oluşturmak için yenilikçi yöntemlerin kullanıma girmesi beklenmektedir. Örneğin, kitle kaynaklı veri toplama (crowdsourcing) ve açık veri platformları sayesinde çiftçiler ve araştırmacılar arasında veri paylaşımı artabilir. Farklı bölgelerden dronelar, tarlalara yerleştirilen akıllı sensör ağları, otonom tarım robotları ve IoT cihazları aracılığıyla sürekli veri akışı sağlanarak, yapay zekâ algoritmaları için gerekli eğitim setleri güncel tutulabilecektir (Atapattu ve ark., 2024). Bu sayede, küçük ölçekli veya marjinal tarım alanlarının verileri de sisteme dahil

edilerek modellerin önyargıları azaltılacak ve genellenebilirlikleri artacaktır. İleride, tarım sektöründe büyük teknoloji firmaları, üniversiteler ve devlet kurumlarının iş birliğiyle küresel tarım veri ağları kurulabilir; bu ağlar üzerinden farklı yabancı ot türlerinin görüntüleri, iklim ve toprak verileri, mücadele sonuçları gibi bilgiler anonim ve standart formatta paylaşılabilir. Böylece bir bölgede eğitilen yapay zekâ modeli, başka bir bölgedeki benzer soruna rahatlıkla uyarlanabilir hale gelecektir.

Geleceğin akıllı yabancı ot kontrol sistemleri, tek bir algı türüne bağlı kalmak yerine çoklu algılayıcı verilerinin füzyonunu (birleşimini) kullanacaktır. Örneğin bir otonom robot, aynı anda hem kameradan gelen görsel veriyi hem de spektral sensörlerden gelen yansıma verisini işleyerek daha güvenilir tespit yapabilir. Bunun yanında coğrafi konum bilgileri (GPS/RTK ile santimetre duyarlılığında konum), toprak nemi, sıcaklık, ışık şiddeti gibi çevresel veriler de algılama sürecine entegre edilecektir. Wang ve ark. (2025), gelecekte görüntü, spektral, konumsal ve çevresel verilerin derin öğrenme modellerinde bir arada kullanıldığı çok modlu (multimodal) veri füzyonu yaklaşımlarının yabancı ot tanıma ve kontrolünde önemli ilerlemeler sağlayacağını belirtmektedir. Örneğin kamera görüntülerinden alınan renk/şekil bilgisi, spektrometreden alınan bitki pigment verisiyle birleşecek; ayrıca konum ve hava durumu verileri de modele dahil edilerek o anki koşullara en uygun tanıma kararı verilecektir. Bu tür bir bütünleşik yaklaşım, tek bir veri kaynağına bağımlı sistemlerin yaşadığı güneş ışığı değişimi, gölge, toprak arka plan varyasyonu gibi sorunları en aza indirecektir. Sonuç olarak çoklu veri kaynağı kullanan derin öğrenme modelleri, farklı bölgelerin farklı yabancı ot ve ürün kompozisyonlarına uyum sağlama yeteneği kazanacak; sistemlerin sağlamlığı ve genellenebilirliği ciddi biçimde artacaktır.

Mevcut otonom sistemler çoğunlukla algılama yapıp önceden programlanmış bir eylemi (ilaçlama, biçme, vb.) uygulamaktadır. Gelecekte ise bu sistemlerin bir adım ileri giderek karar destek mekanizmaları ile donatılması beklenir. Yani robotlar, tarla şartlarındaki değişimleri anlık olarak değerlendirip durumsal kararlar alabilecektir. Örneğin, gerçek zamanlı analizlerle tarladaki yabancı ot popülasyon yoğunluğunu ve gelişim evresini saptayan bir sistem düşünelim. Eğer popülasyon çok düşük ve ekinlere zarar eşliğinin altında ise, sistem ilaçlama yerine mekanik temizliği tercih edebilir veya müdahaleyi bir süre erteleyebilir. Buna karşılık yabancı ot yoğunluğu

kritik eşiğe ulaştıysa, sistem derhal en etkili mücadele yöntemini devreye sokacaktır. Bu çerçevede, sistemin sensörlerinden gelen çok modlu veriler gerçek zamanlı olarak analiz edilip öğrenen bir karar birimi tarafından yorumlanacak; böylece aynı tarlada farklı noktalarda farklı stratejiler uygulamak mümkün olacaktır. Örneğin, sistem hem koçan dolmuş dönemindeki mısır bitkilerinin durumunu hem de yabancı otların fenolojik evresini birlikte değerlendirerek, hangi bölgede lazer gücü ile yakma yapılacağını, hangi bölgede düşük doz kimyasal uygulanacağını veya sadece mekanik çapa ile geçileceğini kendi belirleyebilecektir. Bu tür akıllı adaptasyon, bir yandan etkiyi maksimize ederken bir yandan da enerji ve kaynak tüketimini minimize etmeyi hedefler (Wang ve ark., 2025). Sonuç olarak yapay zekâ destekli sistemler, önceden programlanmış katı kurallar yerine, öğrenebilen ve ortama uyum sağlayan esnek stratejiler güdebileceklerdir.

6. SONUÇ

Yapay zekâ destekli yabancı ot kontrolü, tarımsal üretimde verimliliği artırma ve çevresel sürdürülebilirliği sağlama potansiyeli taşıyan umut verici bir alandır. Mevcut araştırmalar, derin öğrenme algoritmaları ve robotik sistemlerin yabancı ot algılama ve yok etmede geleneksel yöntemlere kıyasla daha hedefe odaklı ve etkin çözümler sunabileceğini göstermektedir. Erken dönem saha denemeleri, bu teknolojilerin herbisit kullanımını önemli ölçüde azaltırken yabancı ot kontrol başarımını koruyabildiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, yapay zekâ tabanlı sistemlerin geniş ölçekli uygulaması önünde veri eksikliği, yüksek maliyetler, altyapı yetersizlikleri ve sosyal kabullenme gibi çok yönlü engeller bulunmaktadır. Bu engellerin aşılması, yalnızca mühendislik alanındaki ilerlemelere değil, aynı zamanda ekonomik destek mekanizmalarının devreye girmesine, eğitim ve yayım faaliyetlerinin etkinliğine ve kapsayıcı politikalara bağlıdır.

Geleceğe bakıldığında, tarım sektörünün yapay zekâ ve otonom sistemlerle dönüşeceği bir yol ayrımında olduğu söylenebilir. Önümüzdeki yıllarda daha akıllı, daha öğrenebilir ve çevreye duyarlı tarım robotlarının tarlalarda çalıştığını, çiftçilerin ise bu robotları yönetmek yerine izleyip stratejik kararlar aldığını görmemiz olasıdır. Hassas tarım konsepti, sadece yabancı ot mücadelesinde değil, toprağın işlenmesinden hasada kadar tüm üretim zincirinde yapay zekâ ile desteklenmiş kararların hâkim olduğu bir

modele evrilecektir. Bu dönüşüm sürecinde, üniversiteler, araştırma enstitüleri, teknoloji firmaları, tarım kuruluşları ve çiftçiler arasında etkin bir iş birliği ve bilgi paylaşımı kritik önem taşıyacaktır. Yapay zekâ destekli yabancı ot kontrolü konusundaki bilimsel literatür her geçen gün zenginleşmekte, yeni yaklaşımlar ve cihazlar tanıtılmaktadır. Bu dinamik alandaki gelişmelerin takibi ve doğru şekilde uygulanması, hem ülkemizde hem de dünyada tarımsal üretimin geleceği açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin yabancı ot yönetimine entegrasyonu, başlangıçta karşılaşılan güçlüklerin zamanla aşılmasıyla birlikte, daha verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir tarım için önemli bir kilometre taşı olacaktır.

KAYNAKÇA

- Atapattu, A. J., Perera, L. K., Nuwarapaksha, T. D., Udumann, S. S., & Dissanayaka, N. S. (2024). Challenges in achieving artificial intelligence in agriculture. In *Artificial intelligence techniques in smart agriculture* (pp. 7-34). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5878-4_2
- Azghadi, M. R., Olsen, A., Wood, J., Saleh, A., Calvert, B., Granshaw, T., ... & Philippa, B. (2024). Precise robotic weed spot-spraying for reduced herbicide usage and improved environmental outcomes--a real-world case study. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110365>
- Bohra, L. S., Radhamani, S., Fanish, S. A., Ravichandran, V., & Maragatham, S. (2025). Advances in site-specific weed management techniques for sustainable crop production. *Plant Science Today*, 12, 8262. <https://doi.org/10.14719/pst.8262>
- Chlingaryan, A., Sukkarieh, S., & Whelan, B. (2018). Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. *Computers and electronics in agriculture*, 151, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- Emmi, L., Fernández, R., Gonzalez-de-Santos, P., Francia, M., Golfarelli, M., Vitali, G., Sandmann, H., Hustedt, M., & Wollweber, M. (2023). Exploiting the Internet Resources for Autonomous Robots in Agriculture. *Agriculture*, 13(5), 1005. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051005>
- Ergün, E. (2025). Harnessing deep learning for multi-class weed species identification in agriculture. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 251-262. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1495040>

- Ghatrehsamani, S., Jha, G., Dutta, W., Molaei, F., Nazrul, F., Fortin, M., Bansal, S., Debangshi, U., & Neupane, J. (2023). Artificial Intelligence Tools and Techniques to Combat Herbicide Resistant Weeds—A Review. *Sustainability*, 15(3), 1843. <https://doi.org/10.3390/su15031843>
- Hu, K., Wang, Z., Coleman, G., Bender, A., Yao, T., Zeng, S., ... & Walsh, M. (2024). Deep learning techniques for in-crop weed recognition in large-scale grain production systems: A review. *Precision Agriculture*, 25(1), 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10073-1>
- Jhala, A. J., Knezevic, S. Z., Ganie, Z. A., & Singh, M. (2014). Integrated weed management in maize. In *Recent Advances in Weed Management* (pp. 177-196). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1019-9_8
- Kounalakis, T., Triantafyllidis, G. A., & Nalpantidis, L. (2016, October). Weed recognition framework for robotic precision farming. In *2016 IEEE international conference on imaging systems and techniques (IST)* (pp. 466-471). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IST.2016.7738271>
- OERKE, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Önen, H. (2021). *Yabancı Otlar ve Herboloji (Yabancı Ot Bilimi)*, 2. Bölüm. "Herboloji (Yabancı Ot Bilimi): İlkeler, Kavramlar ve Uygulamalar /Weed Science: Theory and Practice" içinde (s. 8-27). Adana, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10113.99688>
- Özgür, A., & Nar, F. (2019). Derin öğrenme yöntemleri kullanarak ekin ile yabancı otların birbirinden ayırt edilmesi. In *International Conference on Computer Technologies and Applications in Food and Agriculture*. Konya: ICCTAFA (pp.76-89).
- Padhi, I., & Mishra, K. S. R. (2024). *Artificial Intelligence In Weed Management: A Game Changer In Agriculture*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8280264>

- Pätzold, S., Hbirkou, C., Dicke, D., Gerhards, R., & Welp, G. (2020). Linking weed patterns with soil properties: a long-term case study. *Precision Agriculture*, 21(3), 569-588. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09682-6>
- Qu, H. R., & Su, W. H. (2024). Deep learning-based weed–crop recognition for smart agricultural equipment: A review. *Agronomy*, 14(2), 363. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020363>
- Quan, X., Guo, Q., Ma, J., & Doluschitz, R. (2023). The economic effects of unmanned aerial vehicles in pesticide application: Evidence from Chinese grain farmers. *Precision Agriculture*, 24(5), 1965-1981. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10025-9>
- Shen, Y., Ayanlade, T. T., Boddepalli, V. N., Saadati, M., Rairdin, A., Deng, Z. K., ... & Singh, A. (2025). WeedNet: A Foundation Model-Based Global-to-Local AI Approach for Real-Time Weed Species Identification and Classification. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.18930>
- Sırrı, Mesut & Ataş, Musa & ÇİĞ, Fatih. (2023). YABANCI OTLARIN KONTROLÜNDE OTONOM ROBOTLARIN KULLANILMASI. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10372968>
- Slaughter, D. C., Giles, D. K., & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1), 63-78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008>
- Steward, B., Gai, J., & Tang, L. (2019). The use of agricultural robots in weed management and control. In *Robotics and automation for improving agriculture* (pp. 161-186). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0056.13>
- Tripathi, S. K., Singh, S. P., Sharma, D., & Patekar, H. U. (2025). Weed Detection using Convolutional Neural Network. arXiv preprint arXiv:2502.14360. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.14360>

- Wang, C., Song, C., Xu, T., & Jiang, R. (2025). Precision Weeding in Agriculture: A Comprehensive Review of Intelligent Laser Robots Leveraging Deep Learning Techniques. *Agriculture*, 15(11), 1213. <https://doi.org/10.3390/agriculture15111213>
- Xu K, Zhu Y, Cao W, Jiang X, Jiang Z, Li S and Ni J (2021) Multi-Modal Deep Learning for Weeds Detection in Wheat Field Based on RGB-D Images. *Front. Plant Sci.* 12:732968. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.732968>
- Xu, Y., Gao, Z., Khot, L., Meng, X., & Zhang, Q. (2018). A real-time weed mapping and precision herbicide spraying system for row crops. *Sensors*, 18(12), 4245. <https://doi.org/10.3390/s18124245>
- Yaseen, M. U., & Long, J. M. (2024). Laser weeding technology in cropping systems: a comprehensive review. *Agronomy*, 14(10), 2253. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102253>

BÖLÜM 5

SERALARDA KULLANILAN OTOMASYON SİSTEMLERİ

Arş. Gör. Mustafa Arif TİMOÇİN¹

Arş. Gör. Osman Mert YAZ²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18074316>

¹ Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye. mustafatimocin@erciyes.edu.tr, orcid id: 0000-0002-2937-6998

² Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye. mert yaz@erciyes.edu.tr, orcid id: 0009-0003-3367-6656

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun 2050 ye kadar 9.6 milyara ulaşması beklenmektedir. Bu denli bir büyüme gösteren dünya nüfusunun gıda ihtiyacının karşılanması insanlık için büyük bir sorun ortaya çıkarmaktadır. Bu da gıda üretiminin sürdürülebilir hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır (CEMA, 2024). Bu sorunların çözümü için ise tarımsal aktivitelerin etkililiğinin artırılması ve gıda güvenliğinin sağlanması önemlidir. Tüm bu gereklilikler ve sorunların ardında daha az alan kullanılarak daha fazla ürün üretilmesi gibi bir gereklilik de vardır (Bagagiolo ve ark. 2022).

Dünya üzerinde tarıma elverişli olan alan miktarı artamayacağı için insan beslenmesi için gerekli olan ürünlerin seralarda yetiştirilmesi mantıklı bir hale gelmektedir. Seralar üretim maliyetlerini düşürmek ve verim artışı sağlamak için bitkilerin ihtiyaç duyduğu iklim koşullarının sağlandığı, bitkiler için kontrollü bir ortam sağlayan kapalı yapılar olarak tanımlanabilir (Badgery-Parker 1999). Ülkemiz 2019 yılı için toplam 790 bin dekar sera varlığına sahiptir ve bu alandan toplamda 8.437 bin ton ürün elde edilmiştir (Tarım ve Orman Bakanlığı 2019)

Seralardaki en büyük maliyet girdilerinden birisi de iş gücü ihtiyacıdır. Toplam üretim maliyetlerinin %30'undan fazlası yetiştirici ve çalışanların ücretlerine harcanmaktadır. Buna ek olarak seralardaki vasıflı eleman ihtiyacını karşılayan iş gücü varlığı gün geçtikçe azalmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı seralarda gerçekleştirilecek olan otomasyon bir gereklilik haline gelmektedir (Bagagiolo ve ark. 2022).

Sera otomasyonu tarımsal ürünlere etki eden çevresel faktörleri en aza indirerek tarımsal aktivitelerin uygulanmasını kolaylaştırır. Sera otomasyonu ile uygulanan tarımsal faaliyetler başlıca ekim, hasat, su gibi kaynakların yönetimi veya gübre, herbisit, fungusit gibi kimyasal girdilerin uygulanması olarak sıralanabilir. Bunlar gibi tarımsal faaliyetler hastalıkların ve yabancı otların tespiti için görüntü işleme veya hasat süreçlerinde meyvelerin tanımlanması, su kaynağı yönetimi ve tarımsal üretimde verimi artırmak için diğer yüksek etkili faaliyetlerin yanı sıra herbisit ve gübrelerin yerel olarak uygulanması gibi teknolojilerin uygulanması yoluyla otomatikleştirilmeye oldukça yatkındır (Tangarife ve Diaz 2017).

Yapılan bu çalışma seralarda uygulanan otomasyon sistemlerinin incelenmesi ve bir derlemesi haline getirilmesidir. Hazırlanacak olan bu

derleme sayesinde gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalar için yol gösterici olması beklenmektedir.

2. İKLİM KONTROLÜ OTOMASYON SİSTEMLERİ

İklim kontrolü sera yetiştiriciliğinde en önemli faktörlerden birisidir. Bu da sera otomasyonunda iklim kontrol otomasyon sistemlerini önemli bir noktaya koymaktadır. İklim kontrol sistemleri, sensörlerden alınan verilerle seranın iç ortamını sürekli izleyip otomatik ayarlamalar yapar. Özellikle sıcaklık ve nem seviyelerinin bitki gelişimi üzerindeki doğrudan etkisi düşünüldüğünde, bu sistemler bitki sağlığı açısından oldukça önemlidir (Luts & Kytsenko, 2024).

Seralarda ısıtma işlemi farklı sistemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar;

Üstten borulu ısıtma

- Masa altı ısıtma sistemleri
- Alt borulu ısıtma sistemleri
- Toprak ısıtma sistemleri
- Lateral ısıtma sistemleri
- Sıcak hava üreticiler
- Üstten sıcak hava dağıtıcı
- Alttan sıcak hava dağıtıcı (Yılmaz, 2017)

Kürklü ve Çağlayan (2005) yaptıkları bir çalışmada dışarıdan gelecek etkilere karşı seraların iç iklim şartlarını uygun düzeyde tutmaya yarayacak ucuz, basit ve kullanımı kolay yöntemlerini incelemişlerdir. Çalışmada kullandıkları bilgisayar kontrollü sistem sayesinde sera içerisindeki işlemlerin görüntülenmesi, kontrol edilmesi ve depolanabilmesi açısından kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Çift Tonlu Çoklu Frekans ve radyo sinyalleri kullandıkları çalışmada bilgisayar sistemine göre daha uzaktan kontrol sağlamış ve kablosuz kontrol imkânı sağlamıştır. Gösterge panosundan kontrol sisteminde sera girişine konulan bir pano ile gözlemlenebilen ve yönetilebilen basit bir sistem kullanmışlardır. Baysal ve ark., (2018) Raspberry Pi tek kartlı bilgisayar sistemlerini ve wi-fi modüllerini kullanarak bir Nesnelerin İnterneti (IoT) temelli bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistem sayesinde veri alınan

seraların kablosuz sensörler yardımıyla iç ve dış sıcaklık ve nem değerini, toprak nemi, hava kalitesi ve ışık değerlerini kayıt altına alarak uzaktan erişerek grafik takibi yapmışlardır. Oluşturdukları sistemde ise sensörlerden elde ettikleri veriler kullanıcı tarafından belirlenen alt ve üst sınır değerinin dışına çıktığı durumda kullanıcıya bildirim yapmıştır. Arı (2011) SCADA ve PLC programlarını kullanarak sera içi iklimsel değişkenlikleri (sıcaklık, nem, ışık vs.) kontrol altında tutmuş ve uzaktan TCP/IP haberleşme sistemi sayesinde iklim değerlerini kontrol etmiş ve izlemiştir. Yaptığı çalışmada 7 farklı serada farklı özelliklere sahip ürünleri farklı iklim şartlarında aynı zamanda yetiştirmiştir. Uğur (2021) ise bulanık mantık denetim sistemi ile seralarda iklim koşullarının kontrol edilmesini sağlayan bir sistem geliştirmiştir. Bu sistemi MATLAB Fuzzy Logic Toolbox ile oluşturmuş ve giriş verilerine göre elde ettiği çıkış verilerini Simulink ile test etmiştir. Hazırladığı sistemde giriş verileri olarak; sıcaklık, bağıl nem, toprak nemi, aydınlık şiddeti ve CO2 miktarlarını kullanmıştır. Kontrollü olarak gerçekleştirdiği çıkışlar ise; ısıtma, soğutma, sulama, perdeleme, aydınlatma ve havalandırmadır. Sonuç olarak bulanık mantık ile sistem kontrolünde, dilsel değişkenler ile de kolay yolla kontrol sağlanabileceğini söylemiştir. Doğan (2022) seralarda kullanılan otomasyon sistemlerini mobil cihazlar üzerinden yönetmek üzere bir mobil uygulama geliştirmiş ve bu mobil uygulamayı kullanabileceği bir model sera sistemi kurmuştur. Kurduğu sera sisteminde sıcaklık, nem, havalandırma, ışık, iklimlendirme ile ilgili sistemlere yer vermiştir. Sera içerisindeki verilerin toplanmasında DHT 11 nem ve sıcaklık sensörü, LDR ışık sensörü, FC37 yağmur sensörü, HC-SR501 hareket sensörü, YL69 toprak nem sensörü kullanmıştır. Toplanan bu verilerin işlenmesinde ise ESP32 NDU işlemci kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda ise sensörler sayesinde sulama, ısıtma, aydınlatma gibi verilerin ulaşımı anlık olacağından verim artışı görüleceğini için verim artışı ve su kullanım etkinliğinin artacağını bildirmiştir. Tabatabaeifar ve arkadaşları (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, seralarda yürütülen sulama, ışıklandırma ve gübreleme faaliyetlerinin uzaktan kontrol edilebilmesini sağlayan bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistemi, düşük enerji tüketimi, düşük maliyet ve kolay programlanabilirdik özelliklerine sahip ZigBee ağına dayalı Xbee Series 2 donanımının yanı sıra, kablosuz algılama sistemleriyle donatmışlardır. Sistemde, ortamın nem ve sıcaklık değerlerini ölçmek amacıyla 14 bit çözünürlüğe sahip SHT 75 sensörü, ışık yoğunluğunu

ölçmek için ise 12 bit çözünürlüğe sahip TSL2550 sensörünü kullanmışlardır ve sensörlerden elde edilen veriler, kablosuz sistem geçidi aracılığıyla sabit bir sisteme aktarmışlardır. Sabit sistem, elde edilen verileri işleyerek GSM modemi üzerinden GPRS sistemi ile sunucuya iletmiştir. Sunucuda toplanan veriler, MVC tabanlı web tarayıcıları yardımıyla grafiksel olarak farklı yerlerde görüntülenmesini sağlamışlardır. Ancak, sunucu ile bilgi merkezi arasında bir katman oluşturulmadığı için geçmişe yönelik sistem kayıtlarına erişimin mümkün olmadığını söylemişlerdir. Çalışmada ayrıca internet ile sera arasında bir bağlantının sağlanabildiğini de söylemişlerdir. Baytürk ve arkadaşları (2013) tarafından yürütülen çalışmada, sera tarımının internet tabanlı kontrolü için bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, toprak nemi, sıcaklık ve ortam koşullarını sensörler aracılığıyla algılayarak, verileri Ethernet portu ile desteklenen OLIMEX-PIC WEB takip kartına aktarmıştır. Seradan toplanan bilgiler, gömülü sunucu kartı kullanılarak tarayıcı tabanlı uygulamalar aracılığıyla görüntülenebilir hale getirmiştir. İnternet üzerinden çalışan sabit sunucu kartında, kullanıcı arayüzünün tasarımında Ajax ve Flash animasyon teknolojilerini kullanmışlardır. Topraktaki nemi algılayan cihaz, mikrodenetleyici ile sayısal bir işarete dönüştürdükten sonra, ihtiyaç halinde sulama sistemi otomatik olarak devreye girmesini sağlamıştır. Çalışma kapsamında ayrıca arıza kontrol sistemlerini de geliştirmişlerdir. Bu sistemlerde, elektrikli sulama valfi gibi yüksek akım gerektiren kontrol elemanlarını, mikrodenetleyiciler yardımıyla düşük akımla kontrol etmişlerdir. Arıza kontrol birimi, sisteme bağlı tüm birimlerin çalışmadığı durumları gömülü bir web sitesi üzerinden kullanıcılara iletmesini sağlamışlardır. Bu çalışma, seraların internete bağlanması yoluyla hem uzaktan izleme hem de kontrol sistemlerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir adım sağladığını bildirmişlerdir. Yılmaz ve Doğan (2016) seraların bağıl nem ve sıcaklığının istenilen sınırlar arasında tutabilmek amaçlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Tasarladıkları sera sisteminden elde edilen tüm verilerin izlenmesi, kontrolü ve kaydının tutulması amacıyla özel bir sera yazılımı geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada bağıl nemi %30-90 aralıklarında sıcaklık değerlerinin ise 20-25 °C aralıklarında tutmuşlar ve enerji analizleri gerçekleştirmişlerdir. Sera içerisindeki otomasyon sistemlerinde PLC denetleyicileri kullanmışlardır. Seranın ısıtma gerekliliğini ve enerji gerekliliğini ise güneş enerjisi panellerinden sağlamışlardır. Sonuç olarak kurmuş oldukları tam otomasyonlu

serada yetiştirilen ürünlerin diğer seralara göre yaklaşık olarak 15 gün erken hasat edildiğini belirlemişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu sistemin büyütülerek ürün yetiştiriciliğinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Alpay (2018) seralarda sıcaklık, bağıl nem, toprak nemi ve ışık yoğunluğu gibi çevresel parametrelerin incelenmesi amacıyla bir akıllı sera sistemi geliştirmiştir. Geliştirdiği akıllı sera sistemi ile seranın ısıtılması, soğutulması, ışıklandırılması, gölgelendirilmesi ve sulanması gibi işlemleri uzaktan gerçekleştirmiştir. Sera sisteminde kullanmış olduğu kablosuz sensör ağını bulanık mantık yapay zekâ modeli ile desteklemiş ve tüm bu verilerin toplanıp işlenebileceği ve kullanıcıya uzaktan erişim vereceği bir Android tabanlı uygulama geliştirmiştir. Bulanık mantık sisteminin kullanımının etkin bir rol oynadığını belirtmiştir. Bulanık mantık yapay zekâ modelinin sera ısıtmasında geleneksel ısıtma yöntemlerine göre %20 daha avantajlı olduğu belirlemiştir. Felek ve Kürklü (2023) yaptıkları çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerindeki 5 farklı serada 4 farklı ticari otomasyon sistemini (Priva, Hortimax, Hoogendoorn ve Karaca) incelemişlerdir. Elde edilen verileri birbirleri ile kıyaslamış ve kullanılabilirlik, performans, kapasite, ölçülen veriler gibi birçok alanda da değerlendirmesini yapmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda ise halihazırda mevcut olarak bulunan sera sistemlerinin aksine uzaktan denetleme ve kontrol işlemleri bir servera bağlı bilgisayar yerine SIM kart takılı bir akıllı telefon aracılığı ile de yapılabileceğini söylemişlerdir. Siddiqui ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada dünya üzerinde görülen iklim değişikliği sebebiyle meydana gelen gıda kıtlığına çözüm olarak seraların otomasyonunu, izlenmesini ve bu sistemlerin optimize edilmesini ele almışlardır. Yaptıkları çalışmada arduino mikrodenetleyiciler, ethernet kartları, sistemi gözleyecek sensörler ve aktüatörler gibi elemanlar kullanmışlardır. Bu sayede toprak ve hava sıcaklığı, ışık yoğunluğu ve toprak nemi gibi çevresel parametrelerin kontrolünü sağlamışlardır. Bu çalışma kapsamında kurdukları sistemde sıcaklık kontrolü amacıyla DHT11 ve ışık kontrolü içinse LDR sensörlerini kullanmışlardır. Bu sensörler yardımıyla çevresel koşulları düzenlemişlerdir. Wi-Fi aracılığı ile kurmuş oldukları sistemin kontrolünü uzaktan sağlayabilmişlerdir. Hazırlamış oldukları bu sistemi domates üretimi yapmak için kullanmışlardır. Sonuç olarak ise domates bitkisinin gelişimine katkı sağladığını ve geleneksel yöntemlere göre iki kat daha fazla gelişim gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu sistemin hobi bahçeleri ve küçük çaplı

üreticiler için uygun olduğunu ve maliyetleri azaltmakla beraber bitki büyüme koşullarını optimize ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca modüler tasarımı sayesinde sistemin daha büyük üreticiler ve tarım alanlarına da entegre edilebileceğini söylemişlerdir. Hassan ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada sera içerisindeki çevresel koşulların gözlemlenmesini ve kontrol edilmesini elan bir sera sistemi geliştirmeyi ele almışlardır. Çalışmalarında sıcaklık, nem, ışık yoğunluğu gibi temel mikroklimatik parametrelerin düzenlenmesi için bir kapalı döngü kontrol mekanizması önermektedirler. Sistem DHT22 sıcaklık ve nem sensörleri ile LDR ışık sensörleri ve toprak nem sensörleri ile sera içerisindeki çevresel verileri toplar. Topladığı verileri mikrodenetleyiciler yardımıyla işleyerek belirlenen sınırlar dışına çıktığında sera içerisindeki koşullarının otomatik olarak ayarlanmasını sağlar. Tasarladıkları sistemde Arduinio temelli bir mikrodenetleyici kullanmışlardır. Kullanmış oldukları bu denetleyici tüm sistemin merkezinde yer alarak sensörlerden gelen verileri işler ve farklı aktüatörleri kontrol etmektedir. Tasarlamış oldukları sistemin düşük maliyetli olduğunu ve kolay kurulabilir yapıda olduğunu söylemişlerdir. Aynı zamanda sera içerisindeki koşulların gerçek zamanlı olarak kontrol edilebildiğini de belirtmişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar sera içerisindeki çevresel koşulların iyileştirmesine yönelik pratik ve uygun maliyetli bir çözüm sunmuşlardır. Gelecekte daha fazla parametrenin tasarlanmış olan bu sisteme dahil edilmesi ile bu sistemin geliştirilebileceğini de belirtmişlerdir.

3. SULAMA YÖNETİMİ OTOMASYON SİSTEMLERİ

Sulama bitkilerin net su ihtiyaçlarının beşerî yollar ile verilmesidir. Açık tarım yapılan alanlarda kimi zaman bu ihtiyaç yağmurlar ile karşılanırken kimi zaman da yağmurlara ek olarak insanlar tarafından karşılanabilir. Ancak seralar gibi örtü altı yetiştiriciliği yapılan yerlerde yağmur bitki kök bölgesine ulaşamayacağı için bitki su ihtiyacı sulama ile verilmediler. Otomatik sulama sistemleri, bitki su ihtiyacını sürekli izleyerek sadece gerektiği kadar su sağlar ve bu sayede su tasarrufu sağlanır. Bu sistemler, sensörler aracılığıyla toprak nemini ölçüp, sulama zamanını ve miktarını optimize eder. Ayrıca damla sulama gibi verimli yöntemlerle entegre edilebilmektedir (Panfilov et al., 2024). Kurt ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada tarımsal sulama ve gübreleme işlemlerini kolaylaştırmak, daha verimli hale getirmek ve tarımdaki insan yükünü azaltmak amacıyla bir Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı otomasyon sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları sistem bir mobil uygulama,

kontrol panosu ve sensörlerden oluşmaktadır. Geliştirdikleri sistem toprağın nem seviyesi, hava durumu, su miktarı ve gübre miktarını sürekli izleyen sensörlerle donatmışlardır. Sensörlerden elde ettikleri verileri kullanıcılara e posta yoluyla iletmışler ve geçmişe yönelik raporlama yapmışlardır. Geliştirdikleri otomasyon sistemi Kahramanmaraş'ta 60 m² alanda kullanmışlardır. Bu sayede sistemin güvenilirliğini ve etkinliğini değerlendirmişlerdir. Sonuçta, sistemin düzenli sulama ve gübreleme yaptığı ve bu sayede verimliliğin arttığını su israfının da önüne geçildiğini söylemişlerdir. Bu araştırma sonucunda ise tarımsal üretimde IoT teknolojilerinin uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır. Eriş ve arş., (2022) yaptıkları çalışmada seralarda IoT tabanlı bir tam otomatik sulama sistemi geliştirilmiştir. Çalışmadaki temel amaç su tasarrufunu arttırmak, iş gücü maliyetlerini düşürmek ve bitkiler için optimal sulama koşullarını sağlayarak verim arttırmak olduğunu belirtmişlerdir. Sistemi donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşturmuşlardır. Donanım olarak 10 HS toprak nemi sensörü ve PT1000 sıcaklık sensörü kullanmışlardır. Bu sensörler sayesinde toprak nemi ve sıcaklık verilerini yüksek doğrulukla ölçerek sulama süreçlerini yönlendirmişlerdir. Ayrıca, sulama işlemleri damla sulama yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Tüm verileri bulut tabanlı bir platformda saklamışlar ve kullanıcıların mobil uygulama üzerinden bu verilere erişebilmelerini sağlamışlardır. Çukurova Üniversitesi'nde bir sera ortamında test ettikleri sistem, sulama verimliliği ve su tasarrufunu değerlendirmek amacıyla manuel kontrol ve evapotranspirasyon tabanlı sulama yöntemleriyle karşılaştırmışlardır. Geliştirdikleri sistem, manuel ve evapotranspirasyon tabanlı yöntemlere göre %9 daha az su kullanmıştır. Sistemi, toprağın nem seviyesini 27%-35% arasında tutacak şekilde ayarlamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, geliştirilen sistemle toplam 255,7 ton/da su kullanıldığını söylemişlerdir. Bu değerın manuel kontrolle gerçekleştirilen sulama işlemlerinde 281 ton/da olarak ölçmüşlerdir. Sonuç olarak çalışma IoT tabanlı sulama sistemlerinin tarımsal üretimde verimi arttırabildiği ve su kaynaklarını daha etkin kullanılması için önemli bir çözüm olduğu belirlemişlerdir. Huynh ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada Vietnam'da yaygın olarak yetiştirilen Brassica juncea (hardal otu) yetiştiriciliği için bir akıllı sera sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları sera sistemi Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisinden faydalanmaktadır. Bu sistem sayesinde kullanıcılara gerçek

zamanlı veri takibi ve kontrol imkânı sunabilen bir web tabanlı arayüz ve mobil uygulama ile desteklemiştir. Geliştirmiş oldukları sistemi 30 m²'lik bir serada denemiştir. Bu serayı optimal ışık, sıcaklık, nem ve toprak nemi koşullarını sağlamak için özel olarak tasarlamıştır. Sera yapısında, hava akışını ve ışık dağılımını optimize eden kemer şeklinde bir çatı tasarımı kullanmıştır. Sera içerisinde kullandıkları sensörler ve kontrol sistemleri sayesinde sıcaklık, nem, toprak nemi gibi çevresel faktörleri sürekli izleyerek merkezi bir sistemde analiz etmişler ve sera içerisindeki bu faktörleri otomatik olarak kontrol etmişlerdir. Kurdukları sistemde sulamayı, basınç dengeleyici damla sulama başlıkları ile gerçekleştirmişlerdir ve bu sayede suyun verimli kullanımını sağlamıştır. Serada bu işlemler için gerekli olan enerji ihtiyacını ise yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamıştır, bu amaç ile en çok güneş panelleri ile üretilen güneş enerjisini kullanmıştır. Araştırmanın sonucunda Brassica Juncea bitkisinin büyüme ve veriminin tam otomasyonlu seralarda optimize edildiğini ortaya koymuştur. Çevresel koşulların kontrolü sayesinde su ve enerji kaynaklarının verimli kullanımını sağlamışlar ve yıl boyu stabil üretim yapılabilecek üretim ortamı hazırlamıştır. Ayrıca IoT tabanlı sistem sayesinde üretim sürecindeki insan müdahalesini azaltarak iş gücü maliyetlerini düşürmüştür. Sonuç olarak geliştirdikleri sistem çevresel sürdürülebilirliği desteklediğini yanı sıra tarım sektöründe dijitalleşmeye de katkıda bulunduğunu söylemiştir. Araştırmacılar, bu tür teknolojilerin küresel gıda güvenliği ve iklim değişikliği gibi zorlukların üstesinden gelmede etkili bir çözüm sunduğunu ifade etmektedir. Silva ve ark., (2018) yapmış oldukları çalışmada seralarda sulama süreçlerini otomatikleştirmek amacıyla Arduino tabanlı bir sulama otomasyon sistemi geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, sistemin su ve enerji tüketimini optimize etmesini, maliyetleri düşürmesini ve daha verimli bir üretim süreci sağlamasını hedeflemiştir. Hazırlamış oldukları sistemi nem sensörleri, solenoid vanalar ve bir Arduino kontrol ünitesi kullanılarak tasarlamıştır. Araştırmacılar, toprak nem seviyesini sürekli olarak izleyip sulama sürecini optimize edecek bir yapı oluşturmuştur. Sistem nem seviyesi belirlenen kritik düzeyin altına düştüğünde su akışını başlatarak bitkilerin sulanmasını sağlamaktadır. Ayrıca sistemde bulunan su seviyesi sensörü depoda bulunan su miktarını kontrol etmekte ve deponun doluluğuna göre pompayı çalıştırmaktadır. Kurmuş oldukları sistem bir mobil uygulama üzerinden takip ve kontrol edilebilmektedir. Bu uygulama sayesinde depo

doluluğunu, nem seviyelerini ve sulama işlemleri hakkında gerçek zamanlı bilgi vermektedir. Kurmuş oldukları sistemi laboratuvar testleri ile değerlendirmişlerdir. Yaptıkları testler sonucunda nem sensörlerinin topraktaki nem seviyelerini etkili bir şekilde algıladığını ve sulama kararlarını buna göre yönlendirdiğini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak hazırlanmış olan bu sistemin küçük ve orta ölçekli tarım üreticileri için uygun maliyetli bir otomasyon çözümü sunduğunu söylemişlerdir. Sistemin, su ve enerji kaynaklarının verimli bir şekilde yönetilmesine olanak sağladığını bu sayede de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğunu söylemişlerdir. Elaydi (2017) yaptığı çalışmada su kaynakları kısıtlı olan Gazze Şeridinde seralardaki su kullanımını optimize etmek için otomatik bir damla sulama sistemi tasarlamıştır. Tasarlamış olduğu sistemi SCADA teknolojisini kullanarak sulama, sıcaklık ve nem kontrolünü otomatik hale getirmektedir. Kurmuş olduğu sistemde nem, sıcaklık, su seviyesi sensörleri gibi çeşitli donanımları kullanmıştır. Sera içerisinin kontrolünü ise LABWIEW yazılımı ile birleştirilmiş SCADA teknolojisi ile sağlamıştır. Bu sayede tasarlamış olduğu sistemi internet üzerinden rahatlıkla kontrol etmiştir. Bu teknoloji sayesinde sera içerisindeki koşulları izlemiş ve belirlenen sınırların dışına çıktığında kullanıcıya e posta yolu ile uyarı göndermiştir. Sistemin geçmişe dönük bilgileri kaydetmesini ve kaydettiği verilere kolaylıkla erişilebilmesini sağlamıştır. Bu sayede sulama verimliliğinin artmasını ve sistem performansının değerlendirilebilmesini sağlamıştır. Sonuç olarak tasarlanan bu sistemin sera içerisindeki su kullanımını optimize ederek bitki büyümesini ve gelişimini destekleyen tam otomatik bir çözüm sunduğunu belirtmiştir. Ayrıca gelecekte bu sistem üzerine görüntü işleme sistemlerinin eklenmesi, gerçek saha uygulamalarının yapılması gibi ek geliştirilmelerin yapılmasının ise mümkün olduğunu belirtmiştir. Yıldırım ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada seralarda kurulabilecek bir hidroponik sulama sisteminin tasarlanması ve uygulanmasını ele almaktadır. Yaptıkları çalışmada özellikle üzüm fidanlarını üretiminde kullanılan hidroponik sistemlerin seralarda kullanımı ve bu sayede üretim kapasitesini artırma, ürün kalitesini yükseltme ve pestisit kullanımını azaltma gibi faydaları olduğunu vurgulamışlardır. Hidroponik sistemin kontrolünü PIC16F84 mikrodenetleyici yardımı ile gerçekleştirmişlerdir. Sulama sistemi ise su tankı, dalgıç pompa, güç kaynakları ve diğer cihazlardan oluşmuştur. Tasarlamış oldukları sulama sistemi ise her 4 saate bir 1 dakikalık süre ile sulama gerçekleştirmesini

sağlamışlardır ve bu sayede toprak nemini optimal seviyede tutmuşlardır. Tasarlamış oldukları bu sistem sayesinde su ve gübre tasarrufu sağladıklarını ve ürün kalitesinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak hidroponik sistemlerin seracılıkta başarılı bir şekilde kullanılabileceğini söylemişlerdir. Tasarlamış oldukları bu sistemin küçük ölçekli üreticilerin verimliliğini arttırmaya olanak sağlayacağını belirtmişlerdir. Ayrıca sistemin gelecekte yapılabilecek eklemeler ile daha da geliştirilebileceğini ve farklı bitkilerin üretimi amacıyla da kullanılabilceğini söylemişlerdir. Sivagami ve ark. (2018) sulama ve iklim kontrolünü otomatikleştirmeyi, sera içerisinde yetiştirilen ürünlerin verimliliğini arttırmayı, su kullanımını optimize etmeyi ve el ile müdahaleleri en aza indirmeyi amaçladıkları bir sistem geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Sera içerisinde sulama amacıyla damla sulama yöntemi ve sprinkler sistemlerini bir arada kullanmışlardır ve bu sulama sistemini nem sensörlerinden elde ettikleri veriler ile yapmışlardır bu sayede sulama manuel yapmak yerine otomatik bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sistemi mikrodenetleyiciler, nem sensörleri ve sıcaklık sensörleri gibi az maliyetli bileşenler ile tasarlamışlardır. Kullanmış oldukları kombine sulama sistemi ile su tüketimini %48'e kadar azaltmayı başarmışlardır. Sonuç olarak tasarladıkları bu sistemin tarımda otomasyonu artırarak bitki büyümesini destekleyen optimal koşulların meydana gelmesini sağladığını belirtmişlerdir. Tasarlamış oldukları sisteme gelecekte GSM ve kablosuz ağların entegre edilmesi ile gübre kullanımını optimize edilmesi ve kimyasal analizlerin yapılmasını da hedeflediklerini söylemişlerdir.

4. PEST KONTROLÜ VE BİTKİ SAĞLIĞI İZLEME

Seralarda bitki sağlığını koruma amacıyla kullanılan otomatik sistemler, zararlı böceklerin izlenmesi ve bitki hastalıklarının erken tespiti için büyük önem taşır. Örneğin, hiperspektral görüntüleme ile böcek zararlılarını tespit eden otomasyon sistemleri, geleneksel yöntemlere göre daha hızlı ve etkin çözümler sunar (Krüger et al., 2024). Zhang ve ark., (2023) yaptıkları çalışmada seralarda zararlı popülasyonlarını izlemek ve etkili kontrol stratejileri geliştirmek amacıyla yapay zeka ve görüntü işleme teknolojileri kullanılarak bir otomatik zararlı tanıma sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sistemde zararlıları gerçek zamanlı olarak tanımlayabilmesi ve popülasyonun dinamiklerinin izlenebilmesi için derin öğrenme mekaniklerinden faydalanmışlardır. Geliştirdikleri sistem, LED ışık kaynakları ve yapışkan

tuzak kağıtları ile zararlıların çekilmesini sağlarken, yüksek çözünürlüklü bir endüstriyel kamera ile görüntü toplamaktadır. Kullanmış oldukları kamera, 3280x2464 piksel çözünürlükte çalışmakta ve LED ışıklar sayesinde gece ve gündüz koşullarında eşit kalitede görüntü elde etmektedir. Görüntü işleme aşamasında, zararlıları tanımlamak için YOLOv5 modelini kullanmışlardır. Bu model, özellikle küçük ölçekli nesnelere algılamada yüksek doğruluk oranıyla dikkat çekmiştir. Araştırmacılar, modelin performansını artırmak için kopyala-yapıştır veri artırma tekniğini uygulamış ve küçük zararlıların tanınmasında belirgin bir iyileşme sağlamışlardır. Tasarlanmış olan sistem ile farklı seralarda 40 gün boyunca veri toplamışlardır. Çeri domates ve çilek seralarında yaptıkları gözlemlerde, zararlı türleri arasında tütün beyazsineği, yaprak madencileri, afitler, meyve sinekleri, thrips ve ev sinekleri yer aldığını söylemişlerdir. Elde ettikleri veriler zararlıların popülasyon yoğunluklarının sera türüne göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Çeri domates seralarındaki zararlı yoğunluğunun çilek seralarına kıyasla 1,7 kat daha fazla olduğu tespit etmişlerdir. Geliştirilen sistem, %96 genel tespit doğruluğuna ulaşmış, bazı zararlı türlerinde ise bu oran %99'a kadar yükselmiştir. Araştırmacılar, bu sistemin seralarda zararlı popülasyonlarını erken aşamada tespit ederek pest kontrol kararlarını optimize etmeye yardımcı olduğunu belirtmiştir. Sistem, tarımsal üretimde sürdürülebilirliği destekleyen bir karar destek aracı olarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca, farklı sera türlerinde uygulanabilirliğinin ve gelecekteki iklim koşullarına uyulanabilirliğinin, sistemin potansiyel kullanım alanlarını genişlettiğini söylemişlerdir. Martin-Gomez ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada seralarda pestisit uygulamalarını otomatikleştirmek amacıyla bir sistem tasarımı ve inşası gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar, Kolombiya çiçekçilik sektöründe, özellikle güllerin yetiştirildiği seralarda pestisit uygulamalarını daha hızlı, daha verimli ve operatör sağlığına zarar vermeyecek şekilde gerçekleştirmek için bir otomasyon sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sistemi sera içerisinde bağımsız olarak hareket eden bir raylı yapıya monte etmişlerdir. Hareketli bir ana taşıyıcı üzerinde altı püskürtücüsü bulunan sistem ile pestisit uygulamalarını gerçekleştirmişlerdir. Kurmuş oldukları sistemin hem manuel hem de otomatik modda çalışabilme kapasitesine sahiptir ve bitkilerin fenolojik evrelerine ve boylarına bağlı olarak pestisit uygulamasını düşük, orta veya yüksek miktarlarda gerçekleştirebildiğini söylemişlerdir. Pestisitlerin tanktan püskürtücülere

taşınmasını sağlayan bir hidrolik sistem tasarlamışlardır. Elektriksel kontrol sisteminin ise püskürtme hızını, basıncı ve hareket koordinasyonunu optimize etmek üzere yapılandırmışlardır. Sistemin, manuel yöntemlere kıyasla pestisit uygulama süresini ve kimyasal madde kullanımını önemli ölçüde azalttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, püskürtme nozullarının doğru konumlandırılması sayesinde tüm bitkiler eşit şekilde kaplandığını ve kimyasal verimlilik arttığını söylemişlerdir. Tasarlanmış olan bu sistem sayesinde pestisit uygulamalarını optimize ederek çevresel etkileri azaltıldığını, çiçekçilik sektörünün ticari rekabet gücünü artırıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, operatörlerin kimyasal maddeye maruz kalmasını azaltarak iş sağlığı ve güvenliğine katkı sağlandığını ve daha az pestisit kullanımı ile çevresel sürdürülebilirliğe de destek olduğunu söylemişlerdir. Martin ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada seralarda zararlı tespiti ve tedavisi için yenilikçi bir robot kontrol mimarisi geliştirilmesini konu almışlardır. Araştırmacılar, "Robotframework" adını verdikleri bu mimariyi, mobil manipülatörler aracılığıyla zararlıları erken aşamada tespit etmek ve hedefe yönelik pestisit uygulamaları gerçekleştirmek amacıyla tasarlamışlardır. Geliştirilen kontrol mimarisinde, Robot İşletim Sistemi (ROS) tabanlı modüler bir yapı sunmuşlardır. Sistemin entegre navigasyon, algılama ve manipülasyon modülleri sayesinde esnek ve uyarlanabilir bir yapı sağladığını belirtmişlerdir ve, hata yönetimi, gerçek zamanlı veri toplama, kullanıcı dostu bir arayüz gibi özellikler ile sistemin işlevselliğini artırmışlardır. Sistem için geliştirilen mimari yapıların hem üst hem de alt yüzeylerinden yüksek kaliteli görüntüler alarak zararlıları tespit etmişlerdir. Entegre Zararlı Yönetimi (IPM) stratejileri ile zararlı yoğunluğunu analiz ederek hedefe yönelik pestisit uygulama planları oluşturmuşlardır. Pestisit uygulamaları, robotun manipülatör kolu tarafından hassas bir şekilde gerçekleştirmişler ve böylece kimyasal kullanımının minimum seviyeye indirilmesini sağlamışlardır. Sera içerisinde hareket etmesi için tasarlanan robot yüksek hassasiyetli bir navigasyon sistemi kullanarak hareket etmektedir. Yaprakların ve zararlıların tespiti için derin öğrenme modelleri kullanmışlardır. Robot, her bir bitki bölgesine otonom bir şekilde giderek hedeflenen görevleri yerine getirmiştir. Sistem performansını hem simülasyon hem de gerçek saha testleri ile değerlendirmişlerdir. Gazebo simülatörü kullanılarak yaptıkları testlerde, zararlıların %98,25 oranında etkin bir şekilde kontrol edildiğini ve yalnızca %1,75'lik bir enfekte alan kaldığını tespit etmişlerdir. Gerçek sera

ortamında yaptıkları testlerde ise robotun manipülasyon ve algılama modüllerinin başarılı bir şekilde çalıştığını ve zararlıların erken aşamada tespit edilerek pestisit uygulamalarının hassasiyetle gerçekleştirildiği belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda Robotframework sisteminin hem tarımsal hem de endüstriyel uygulamalar için uyarlanabilir bir yapı sunarak geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar, bu çalışmanın tarımda otonom sistemlerin geliştirilmesine ve entegre zararlı yönetimi stratejilerinin uygulanmasına önemli katkılar sağladığını ifade etmişlerdir.

5. MAKİNE ÖĞRENİMİ VE YAPAY ZEKÂ TABANLI OTOMASYON SİSTEMLERİ

Yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak seralarda veri analizi yapılmakta ve bitkilerin sulama, gübreleme gibi ihtiyaçları optimize edilmektedir. Bu sistemler, sensörlerden ve geçmiş verilerden alınan bilgilerle gelecekteki ihtiyaçları öngörebilir ve otomatik kararlar alabilir (Ortiz Zambrano, 2024). Morales-Garcia ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada sera iklim kontrolü için yapay zeka ve makine öğrenimi modellerinin doğruluğunu artırmak amacıyla sentetik veri üretimi incelemişlerdir. Araştırmacılar, Murcia, İspanya'daki bir seradan alınan sıcaklık verilerini kullanarak Generative Adversarial Networks (GANs) teknolojisi ile sentetik zaman serisi verileri üretmişlerdir. GANs kullanılarak farklı zaman aralıklarında (15 dakika, 30 dakika ve 60 dakika) sentetik veri üretmişlerdir. GANs, uzun zaman serilerindeki korelasyonu yakalamak ve model çökmesi gibi olası sorunları önlemek için özel mekanizmalarla donatmışlardır. Araştırmacılar, üretilen sentetik veri setlerini istatistiksel analizlerle değerlendirmiş ve bu verilerin gerçek verilerle büyük ölçüde benzerlik gösterdiğini tespit etmiştir. Yaptıkları çalışmada farklı yapay zekâ modelleri (MLP, CNN, LSTM ve CNN-LSTM kombinasyonu) değerlendirmişlerdir. Modellerin yalnızca gerçek veri ile eğitildiğinde daha düşük performans sergilediği, ancak sentetik ve gerçek verilerin bir kombinasyonu kullanıldığında en iyi sonuçların elde edildiğini söylemişlerdir. Sentetik verilerin, yapay zeka modellerinin doğruluğunu artırdığı ve sera iklim kontrolü için daha etkili tahminler yapılmasını sağladığı belirtmişlerdir. Sonuç olarak sentetik veri üretiminin özellikle tarımsal uygulamalarda yapay zeka modellerinin performansını artırmak için güçlü bir araç olduğunu göstermişlerdir. Kullanılan GANs teknolojisinin, tarımsal

kaynakların daha verimli kullanılması ve iklim değişkenlerinin tahmini için sera otomasyon sistemlerine entegre edilebileceği ifade etmişlerdir. Bu tür çalışmaların, sera yönetiminde yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamalarının geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacağını söylemişlerdir. Taki ve ark.,(2018) yaptıkları bu çalışmada seralarda iklim kontrolü ve enerji değişiminin tahmini için Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) modellerini karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Araştırmayı İran'ın Isfahan Eyaleti'ndeki Shahreza şehrinde bulunan geleneksel bir serada gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, sera içi sıcaklık, bitki sıcaklığı ve toprak sıcaklığı gibi parametreler ile enerji kaybı ve değişimi tahmin etmişlerdir. Araştırmacılar, veri toplama sürecinde iç ve dış ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve güneş radyasyonu gibi çevresel değişkenleri ölçmüşlerdir. Modellerin performansını değerlendirmek için K-fold çapraz doğrulama yöntemi kullanılmışlardır. ANN modellerinde Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) algoritmalarını tercih etmişlerdir. SVM modelini ise farklı çekirdek fonksiyonları (linear, polynomial, RBF) ile test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar kapsamında RBF modelinin diğer modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ve bu modelde, hata oranları oldukça düşük (RMSE 0.07-0.13°C, MAPE %0.28-%0.60) olduğunu ve tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu belirlemişlerdir. MLP ve SVM modelleri de kabul edilebilir doğruluk oranlarına sahip olmakla birlikte, RBF modelinin performansına yetişemediğini belirtmişlerdir. Enerji değişimi analizi kapsamında ise sera içindeki enerji transferi ve kayıpları (iletim, taşınım ve ışıınım) matematiksel modellerle incelemişlerdir. Gün boyunca enerji akışının yönü ve büyüklüğü değerlendirmişler ve RBF modelinin gerçek verilerle yüksek düzeyde uyum sağladığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, çalışmanın geleneksel sera yönetiminde yapay zekâ tabanlı modellerin kullanılmasıyla daha hassas bir iklim kontrolü sağlanabileceğini ve enerji verimliliğinin artırılabilirliğini ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Özellikle RBF modelinin, küçük veri gruplarıyla bile güvenilir tahminler yapabilmesi, sera ortamlarının yönetiminde etkili bir araç olduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, bu tür modellerin çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemek amacıyla geniş ölçekli sera uygulamalarına entegrasyonunu önermektedir. Elvanidi ve Katsoulas (2022) yaptıkları çalışmada sera ortamında bitki stresini tespit etmek amacıyla makine öğrenimi modellerinin

kullanımını incelemişlerdir. Araştırmacılar, özellikle fotosentez oranı ve çevresel verileri birleştirerek bitki stresini erken aşamada tanımlamak için Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Gradient Boosting (GB) modellerini geliştirmiştir. Çalışmalarını Yunanistan'daki Thessaly Üniversitesi'ne bağlı bir serada yürütmüş ve domates bitkileri üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Araştırma kapsamında, domates bitkilerini çeşitli stres koşullarına (düşük sıcaklık, düşük besin ve su stresi) maruz bırakmışlardır. Bu süreçte fotosentez oranı, yaprak sıcaklığı, hava sıcaklığı, nem ve güneş radyasyonu gibi parametrelerden oluşan 13.828 veri örneği toplamışlardır. Toplamış oldukları bu verileri stres türlerini sınıflandırmak amacıyla iki makine öğrenimi modeli ile analiz etmişlerdir. Kullanmış oldukları modelleri PRI, sıcaklık, nem gibi 7 temel özellik kullanılarak eğitmişler ve daha sonra basit bir veri kümesi ile test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, Gradient Boosting modeli, eğitim aşamasında %100 ve test aşamasında %91 doğruluk oranı ile en yüksek performansı gösterdiğini söylemişlerdir. MLP modeli ise eğitimde %91 ve testte %89 doğruluk oranına ulaşmıştır. Kullanmış oldukları her iki model de bitki stresi türlerini doğru bir şekilde sınıflandırmıştır. Ayrıca, fotosentez oranı ve yaprak sıcaklığı verilerinin mikroklimatik faktörlerle birleştirilmesinin, bitki stresinin daha hassas bir şekilde tespit edilmesine olanak tanıdığı belirlenmiştir. Sonuç olarak makine öğrenimi tabanlı modellerin sera bitkilerinde stresin erken tespiti için etkili araçlar sunduğunu göstermiştir. Jung (2020) yapmış olduğu doktora tezinde akıllı seralarda iklim kontrolünü optimize etmek amacıyla yapay zekâ (AI) ve derin öğrenme algoritmalarını temel alan bir sistem geliştirmiştir. Araştırma çapında geleneksel kontrol algoritmalarının sınırlarını aşarak, büyük veri ve yapay zekâ modelleri ile daha hassas ve enerji verimli bir iklim kontrolü sağlamayı hedeflemiştir. Bu amaç ile seralarda sıcaklık, nem ve karbon dioksit (CO₂) seviyelerini optimize ederek bitki büyümesi için ideal bir ortam oluşturmayı hedeflemiştir. Bu doğrultuda, iklim değişkenlerini tahmin etmek ve kontrol etmek için hem lineer algoritmalar hem de derin öğrenme tabanlı modeller geliştirmiştir. Ayrıca, enerji verimliliğini artırmak için yapay zekâ optimizasyon algoritmaları kullanmıştır. Lineer algoritmalar ve kontrol modelleri kapsamında, PD-band ve P-band tabanlı algoritmalar kullanmış, sera aktüatörlerinin kontrolü için optimizasyon yapmıştır. Yanıt yüzey analizi yöntemi ile ideal havalandırma kontrol parametrelerini belirlemiş ve uygulamalarda %1.25°C'lik bir ortalama kare hatası (RMSE) tespit etmiştir.

Derin öğrenme tabanlı modellerde, Yapay Sinir Ağları (ANN), NARX, RNN-LSTM ve CNN-LSTM gibi farklı algoritmalar geliştirmiş ve test etmiştir. Bulgular, RNN-LSTM modelinin sıcaklık ve CO₂ tahmini için en yüksek doğruluğu sağladığını (%5 standart hata, 0.81–0.96 R² aralığı) gösterdiğini söylemiştir. CNN-LSTM modeli ise nem tahmini performansında diğer modellere göre üstün bir performans sergilediğini ifade etmiştir. Optimizasyon çalışmaları kapsamında, çıkış geri bildirimli sinir ağı (OFNN) modeli geliştirmiştir. Gradient descent tabanlı bir optimizasyon algoritması kullanılarak enerji tüketimi azaltmış ve saha testlerinde enerji tasarruflarının sağlandığı doğrulanmıştır. Sonuç olarak bu çalışmanın yapay zekâ tabanlı kontrol sistemlerinin seralarda etkin bir şekilde kullanılabileceğini gösterdiğini belirtmiştir. Yapay zekâ destekli bu sistemlerin, enerji maliyetlerini azaltmanın yanı sıra ürün kalitesini ve verimliliğini artırmada etkili olduğu ifade etmiştir. Lin ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada uzaktan algılama görüntüleri ve makine öğrenimi tabanlı bir akıllı sera sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, bu sistemi sebze yetiştiriciliğinde hastalık ve zararlıların etkilerini en aza indirmek, verim kayıplarını azaltmak ve üretim kalitesini artırmak amacıyla tasarlamışlardır. Sisteme, sebzelerin büyüme sürecini izlemek ve tarımsal ekonomik büyümeye katkıda bulunmak için uzaktan algılama teknolojileri ile yapay zeka algoritmalarını entegre etmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu sistem algılama katmanı, ağ iletişim katmanı ve uygulama katmanı olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır. Algılama katmanında sebzelerin yaşam ortamını ve çevresel koşulları izlemek için sensörleri kullanmışlardır. Toplanan verileri, ağ katmanı aracılığıyla sunucuya iletmış ve burada analiz etmişlerdir. Uygulama katmanında ise kullanıcılara sera ortamını uzaktan yönetmiş ve gerektiğinde müdahalede bulunmuşlardır. Veri akışı sürecinde, sensörlerden alınan veriler NB-IoT protokolleri ve HTTP aracılığıyla ana kontrol birimine aktarmışlardır. Bu verileri, sebze büyümesini etkileyen zararlıları tespit etmek ve bitkilerin büyüme aşamasına uygun besin çözeltilerini uygulamak amacıyla analiz etmişlerdir. Görüntü işleme algoritmaları, sebze yapraklarındaki hastalıkların ve zararlıların tespitinde önemli bir rol oynamıştır. Araştırmacılar, HSV renk uzayı histogramları ve yerel ikili desen (LBP) yöntemlerini kullanarak zararlı türlerini doğru bir şekilde sınıflandırmayı başarmışlardır. Mahalanobis ve Manhattan mesafesi gibi analiz yöntemleri, sebzelerin yaprak renk ve doku özelliklerini

değerlendirerek zararlıların doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamışlardır. Kurdukları sistem yüksek çözünürlüklü kameralar, sensör modülleri, ana kontrol cihazı ve besin çözeltisi uygulama birimlerini içermektedir. Araştırmacılar, verilerin doğru şekilde toplanması ve işlenmesi için RS485 sensör protokolü ve STM32F407ZGT6 çip tabanlı bir kontrol birimi kullanmışlardır. Sonuç olarak bu sistem, tarım sektöründe uzaktan algılama ve makine öğreniminin yenilikçi bir uygulamasını sunmaktadır. Zararlıların erken tespiti ve büyüme aşamalarına uygun besin yönetimi sayesinde üretim verimliliğini arttırmış ve sebze kalitesi iyileştirmiştir. Bunun yanı sıra, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bu sistemin ekonomik büyümeye katkı sağladığını belirtmiştir. Araştırmacılar bu çalışmanın akıllı tarım uygulamalarını güçlendirme ve tarımsal sürdürülebilirliği destekleme potansiyeline sahip olduğu vurgulamışlardır. Park ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada geleneksel sera yönetim sistemlerinin aksine sadece sera içerisindeki çevresel verilerin değil aynı zamanda bitkilere ait verilerin de toplandığı bir sistem geliştirmişlerdir. Bu amaç ile bitkilerin yaprak sıcaklığı ve yaprak üzerindeki nem oranını da ölçen sensörler kullanmışlardır. Bu sayede bitki hastalıklarının önlenmesini ve bitki sağlığını arttırmasını sağlamışlardır. Sera içerisinde kablosuz sensör ağı (WSN) sistemini kullanmışlardır bu sayede daha düşük maliyetli ve kolay kurulum sağlanan bir sistem geliştirmişlerdir. Tasarlamış ve kurmuş oldukları bu sistem Zigbee tabanlı bir sistem olmuştur. Bu sistem sensörlerden elde edilen verilerin işlenmesine ve bu sayede sera içerisindeki ortamı otomatik olarak optimize edilmesini sağlamıştır. Sensörlerden elde etmiş oldukları verileri yerel veya bulut sisteminde saklanabileceğini belirtmişlerdir. Bu sayede de kullanıcıların internet üzerinden seranın izlenmesini ve kontrol edilebilmesini sağlamışlardır. Hazırlamış oldukları bu sistemin ürün verimliliğinin artırılmasında kullanılabileceğini ve farklı ürünlerin ihtiyaçlarına göre özelleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak ise kablosuz sensör ağına sahip bu sistemin sera ortamının daha verimli bir biçimde yönetilmesine olanak sağladığını ve bitki sağlığının korunmasına olanak sağladığını söylemişlerdir. Danita ve ark. (2018) seralarda çevresel koşulların kontrol edilmesi amacıyla IoT (Nesnelerin İnterneti) tabanlı bir otomasyon sistemi tasarlamışlardır. Tasarlamış oldukları sistem sera içerisindeki nem ve toprak nemini, sıcaklık gibi parametreleri kontrol ederek bitki büyümesini ve verimliliğini optimize etmiştir. Mikrodenetleyici olarak

Raspberry Pi 3 tabanlı bir mikrodenetleyici, sıcaklık sensörü ve nem sensörü olarak DHT11, toprak nem sensörü olarak ise YL69 model sensörleri kullanmışlardır. Sensörler yardımı ile toplamış oldukları verileri mikrodenetleyici yardımı ile işlemişlerdir ve bu sayede sulama boruları, soğutma fanı ve kayar pençeler gibi aktüatörleri yönetmişlerdir. Elde ettikleri verileri ThingSpeak bulut tabanlı platformda saklamışlar ve kullanıcıların bu verilere istenildiği anda istenildiği zamanda internet üzerinden erişimini sağlamışlardır. Sera içerisindeki değişkenlerin belirlenen sınırların dışına çıktığında soğutma fanı, kayar pencereler gibi aktüatörlerin devreye girmesini ve sera çevresel faktörlerin düzenlenmesini sağlamışlardır. Bu sayede sera içerisini tam otomasyonlu olarak kontrol etmişlerdir. Sonuç olarak IoT tabanlı otomasyon sistemlerinin seracılıkta çevresel faktörleri kontrol etme ve yönetmede etkili bir çözüm sunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca gelecekte farklı bitki türlerine ve koşullarına göre uygulanabilirliği ile geniş bir potansiyele sahip olduğunu da belirtmişlerdir.

6. ENERJİ YÖNETİMİ OTOMASYON SİSTEMLERİ

Seralarda enerji yönetimi de önemli bir konudur. Özellikle sera ortamında enerji tüketimini azaltmaya yönelik otomatik sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilebilmekte ve böylece sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Islam et al., 2024). Bersani ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada Akıllı seralarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla Model Öngörülü Kontrol (MPC) yöntemlerinin kullanımını ele almışlardır. Araştırmacılar, seralarda iklim kontrolü ve enerji yönetiminin, tarımsal üretimde sürdürülebilirliği sağlamak için kritik bir alan olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmada, enerji tüketimini azaltmayı, su ve pestisit kullanımını optimize etmeyi ve sera içindeki mikroklimatik koşulları daha etkin bir şekilde yönetmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmada MPC yöntemini sera içerisi sıcaklık, nem ve karbon dioksit (CO₂) seviyeleri gibi değişkenleri kontrol etmek için kullanmışlardır. MPC kontrol yönteminin, geleneksel PID kontrol yöntemlerinden farklı olarak, sistemin gelecekteki dinamiklerini tahmin ederek daha verimli bir kontrol sağladığını belirtmişlerdir. MPC yöntemi ile sera ortamındaki ısıtma ve soğutma ihtiyaçları için gerekli olan enerji tüketimini azaltmayı başarmışlardır. Araştırmacılar, MPC ile yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle güneş enerjisinin, entegrasyonunu sağlayarak enerji verimliliğini artırmayı başarmışlardır. İklim değişkenlerinin (sıcaklık ve nem)

kontrolü ve su tüketiminin yönetimi, sera içi mikroklimayı optimize ederek bitki büyümesi için ideal koşulları sağladığını söylemişlerdir. Ayrıca, MPC'nin geleneksel kontrol yöntemleriyle karşılaştırıldığında, enerji verimliliğini %60'a varan oranlarda artırdığı ve daha hassas iklim kontrolü sağladığı tespit etmişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilen MPC sistemlerinin, enerji ve su tüketimini en aza indirerek sürdürülebilir tarım uygulamalarına önemli katkılar sağladığı ifade etmişlerdir ve bu yaklaşımın sıfır enerji ve sıfır su tüketimi hedeflerini destekleyen yenilikçi çözümler sunduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar, sera ağları gibi sistemlerin enerji yönetimine katkıda bulunabileceğini ve akıllı seraların mikro şebeke uygulamaları ile iş birliği içinde çalışabileceğini belirtmektedir. Bu tür yaklaşımlar, tarımsal sürdürülebilirliği artırmada önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Jamshidi ve ark., (2023) seralarda enerji tüketimini optimize etmek ve sürdürülebilirliği artırmak amacıyla akıllı enerji yönetimi sistemlerinin (EMS) uygulanabilirliğini ele almıştır. Araştırmacılar, yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) entegrasyonu ile geleneksel enerji tüketimine olan bağımlılığı azaltmayı ve sera ortamlarında enerji verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Yaptıkları çalışmada EMS'nin sera ortamlarında güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak için geliştirdiği belirtmişlerdir. Akıllı EMS'nin, geleneksel enerji yönetim sistemlerine kıyasla makine öğrenimi ve tahmin algoritmalarını kullanarak dinamik çevresel koşullara uyum sağlama yeteneği ile öne çıktığını söylemişlerdir. Araştırmacılar, ağ enerjisi tüketimini minimize ederken batarya doluluk oranını (SOC) maksimize eden çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmiştir. Bu yaklaşımda, enerji kullanımında yüksek verimlilik ve adaptasyon sağlamak için plato zamanı, tahmin süresi ve optimizasyon zamanı gibi hiperparametreleri optimize etmişlerdir. Yaptıkları simülasyonları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirmişlerdir ve akıllı EMS'nin geleneksel yöntemlere kıyasla %50'den fazla enerji tasarrufu sağladığı belirtmişlerdir. EMS'nin, değişen yük profilleri ve çevresel koşullar altında tutarlı bir performans sergilediğini göstermişlerdir. Kısmi gölgeleme gibi doğal olaylar karşısında bile EMS'nin yalnızca %0.35553 gibi düşük bir performans kaybı yaşadığı tespit etmişlerdir. Araştırmada, EMS'nin çevresel etkileri azaltmada önemli bir rol oynadığı ve enerji tüketimindeki azalma ile karbon ayak izinin minimize edildiği ifade edilmektedir. Ayrıca, enerji

maliyetlerindeki düşüşün seraların ekonomik sürdürülebilirliğine katkı sağladığı da belirtilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma, akıllı EMS'nin sera operasyonlarında enerji tüketimini optimize etmek ve yenilenebilir enerji kullanımını artırmak için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür çalışmalar, tarımsal üretimde daha sürdürülebilir ve enerji verimli çözümler geliştirilmesi için kritik bir adım olarak değerlendirilmelidir. Vadiée ve Martin (2012) kapalı sera konsepti ile sürdürülebilir enerji yönetimi yaklaşımlarını incelemiştir. Kapalı sera konseptini, güneş enerjisinin etkin bir şekilde kullanılması ve termal enerji depolama (TES) sistemlerinin entegrasyonunu içeren yenilikçi bir yaklaşım olarak ele almışlardır. Kapalı seraları, havalandırma pencereleri olmayan ve içerideki fazla sıcaklık ile nemin enerji depolama sistemlerinde biriktirildiği yapılar olarak tanımlamışlardır. Bu sistemlerin, sera içindeki ısıtma ihtiyaçlarını karşılamadan yanı sıra çevredeki binalara enerji sağlamak için de kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalara göre, yaz aylarında biriken fazla ısı, seranın yıllık ısıtma ihtiyacının üç katına kadar ulaşabilmektedir. Ancak, enerji talebinin zirve yaptığı dönemlerde destekleyici sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Kapalı seraların enerji verimliliğini artırdığı, yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırdığı ve fosil yakıt emisyonlarını azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, bu sistemlerin su tasarrufu sağladığını ve pestisit kullanımını azalttığını ifade etmişlerdir. Bu konsept, güneş enerjisi ve yeraltı suyu gibi yenilenebilir kaynakları kullanarak sürdürülebilir bir tarım çözümü sunduğunu ve bununla birlikte, kapalı seraların yalnızca tarımsal üretim için değil, çevredeki binalara enerji sağlamak için de kullanılabilceği vurgulamışlardır. Araştırmacılar, bu sistemlerin karmaşık iklim kontrol mekanizmaları ve verimli TES teknolojileri gerektirdiğini belirtmektedir. Ayrıca, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve teknik bilgi eksikliği gibi sorunları bulunduğunu söylemişlerdir. Araştırmacılar yapısal tasarımların ve yalıtım malzemelerinin optimize edilmesinin de önemli olduğunu bunun yanı sıra, ısı değiştiricilerin düşük sıcaklık farklarında çalışması gerektiğini ve CO₂ seviyelerinin kontrol edilmesinin fotosentez verimliliğini artırmada etkili olduğu ifade etmiştir. Araştırmacılar, kapalı sera konseptinin enerji tasarrufu, çevresel sürdürülebilirlik ve tarımsal üretimde verimlilik açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ancak, bu sistemlerin geniş ölçekli uygulanabilirliği, TES teknolojilerinin gelişimine ve enerji yönetimi stratejilerinin optimize edilmesine bağlı olduğunu

söylemişlerdir. Bu çalışma, kapalı sera konseptinin yalnızca tarımsal üretimi desteklemekle kalmayıp aynı zamanda enerji üretim merkezi olarak işlev görebileceğini göstermektedir. Sürdürülebilir tarım uygulamalarını güçlendirmek ve karbon ayak izini azaltmak için bu tür yenilikçi yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır. Kolokotsa ve ark., (2007) yaptıkları çalışmada seralarda mikroklima kontrolü ve enerji yönetimi için akıllı bir sistemin geliştirilmesini konu almışlardır. Araştırmacılar, sera ortamındaki sıcaklık, nem, aydınlatma ve karbon dioksit (CO₂) seviyelerini düzenlemek için bulanık mantık kontrolörleri kullanmayı hedeflemiştir. Bu yaklaşım sayesinde enerji verimliliğini artırmayı ve tarımsal üretimde sürdürülebilirliği desteklemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, TRNSYS simülasyon ortamında bir sera modeli geliştirmişlerdir. Bu model, sera içindeki ısı dengesi, nem, CO₂ seviyeleri ve ışıınım hesaplamalarını içeren bir dizi matematiksel modeli kapsamaktadır. Sistemi, doğal havalandırma ve gölgeleme gibi pasif enerji yöntemleri ile ısıtma ve soğutma sistemleri gibi aktif enerji kaynakları arasında denge sağlayacak şekilde tasarlamışlardır. Bulanık mantık kontrolörleri, sistemin temel unsurlarından birini oluşturmaktadır. Araştırmacılar, iki ayrı kontrolör tasarlamışlardır. İlk kontrolör, CO₂ konsantrasyonu ve aydınlatmayı optimize etmekte; ikinci kontrolör ise sıcaklık ve nem seviyelerini düzenlemeye odaklanmaktadır. Sistemi, Yunanistan'daki Akdeniz Agronomi Enstitüsü'nde bir serada test etmişlerdir. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları ile sistemin enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığını ve istenen mikroklima koşullarını etkili bir şekilde sağladığını belirtmişlerdir. Pasif enerji yönetimi yöntemlerinin önceliklendirilmesi sayesinde enerji maliyetleri düşürülmüş ve CO₂ zenginleştirme ile aydınlatma süreçleri düşük maliyetli stratejilerle optimize etmişlerdir. Çalışma seralarda mikroklima kontrolünü ve enerji yönetimini iyileştirmek için yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur. Araştırmacılar, geliştirilen bulanık mantık kontrolörlerinin enerji verimliliğini artırmak için sera ortamındaki değişkenlerin doğrusal olmayan özelliklerini etkili bir şekilde ele aldığını ifade etmişlerdir. Pasif ve aktif enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonu, sera operasyonlarında sürdürülebilirliği artırmıştır. Gelecekteki çalışmalar için araştırmacılar, bu sistemin daha büyük ölçekli seralara uygulanmasını ve farklı tarımsal koşullarda test edilmesini önermektedir. Ayrıca, enerji tüketimini daha da optimize etmek için makine öğrenimi ve yapay zekâ entegrasyonunun değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

7. SONUÇ

Sonuç olarak, seralarda kullanılan otomasyon sistemleri, modern tarımın karşı karşıya olduğu zorlukların üstesinden gelmek için kritik bir çözüm sunmaktadır. İklim kontrolünden sulama yönetimine, pest kontrolünden enerji yönetimine kadar birçok alanda bu sistemler, üretim süreçlerini optimize ederek verimliliği artırmakta ve kaynakların daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Sera otomasyonu, yalnızca bitki büyümesini desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda su ve enerji tasarrufu gibi çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada da önemli bir rol oynamaktadır. Otomasyon teknolojilerinin gelişmesiyle, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi yenilikçi yaklaşımlar, tarımsal süreçlerin daha hassas ve verimli bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Zararlıların ve hastalıkların erken tespiti, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve IoT tabanlı sistemlerin entegrasyonu, sera tarımında daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşımın kapılarını açmaktadır. Özellikle kapalı sera konsepti gibi yenilikçi uygulamalar hem tarımsal üretimi hem de enerji yönetimini bir araya getirerek ekonomik ve çevresel faydaları birleştirmektedir. Bu derleme, sera otomasyonu sistemlerinin yalnızca mevcut tarımsal uygulamalarda değil, gelecekteki gıda güvenliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada da oynayacağı kritik rolü vurgulamaktadır. Gelecekte, bu sistemlerin daha geniş bir şekilde uygulanması ve yeni teknolojilerle entegrasyonu sayesinde sera tarımının etkinliğinin daha da artması beklenmektedir. Böylece, tarımsal üretimde verimlilik ve sürdürülebilirlik arasında dengeli bir yaklaşım sağlanarak, küresel gıda güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılabilecektir.

KAYNAKÇA

- Alpay, Ö. (2018). Sera uygulamalarında bulanık mantık tabanlı uzaktan kontrol sistemi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Arı, Y. S. (2011). Birden Fazla Seranın, Plc ve Scada Yazılımı İle Kontrolü ve İnternet Üzerinden İzlenmesi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Badgery-Parker, J. 1999. The greenhouse. Agnote DPI/249. New South Wales
- Bagagiolo, G., Matranga, G., Cavallo, E., & Pampuro, N. (2022). Greenhouse robots: Ultimate solutions to improve automation in protected cropping systems—a review. *Sustainability*, 14(11), 6436.
- Baysal, K., Özcan, M. O., Özdüven, F. F., & Beynek, B. (2018). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Bir Sera Takip Sistemi. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 8(2), 49-56.
- Baytürk, M., Çetin, G., ve Çetin, A. (2013). Gömülü sunucu ile tasarlanmış internet tabanlı sera otomasyon sistemi uygulaması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 6 (2), 53-57.
- Bersani, C., Ouammi, A., Sacile, R., & Zero, E. (2020). Model predictive control of smart greenhouses as the path towards near zero energy consumption. *Energies*, 13(14), 3647.
- CEMA. European Agricultural Machinery. Available online: <https://www.cema-agri.org/> (accessed on 23 October 2024).
- da Silva, L. M., Júnior, E. H., Carneiro, K. J., de Matos, J. M., de Vieira, A. A. M. C., & da Silva Barreto, R. (2018, June). Tellur–Greenhouse Irrigation Automation System. In 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) (pp. 01239-01242). IEEE.
- Danita, M., Mathew, B., Shereen, N., Sharon, N., & Paul, J. J. (2018, June). IoT based automated greenhouse monitoring system. In 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS) (pp. 1933-1937). IEEE.
- Doğan, M. F. (2022). Mobil uygulama ile sera otomasyon sistemlerinin kontrolü (Master's thesis, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Elaydi, H. (2017). An automated irrigation system for greenhouses. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 5(2), 48-57.

- Elvanidi, A., & Katsoulas, N. (2022). Machine learning-based crop stress detection in greenhouses. *Plants*, 12(1), 52.
- Eriş, H., Çeliktopuz, E., Çevik, U., & Kapur, B. A Design of Fully Automated Irrigation System IoT-Based Approach for Greenhouses. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 699-706.
- Hassan, N., Abdullah, S. I., Noor, A. S., & Alam, M. (2015, September). An automatic monitoring and control system inside greenhouse. In 2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET) (pp. 1-5). IEEE.
- Huynh, H. X., Tran, L. N., & Duong-Trung, N. (2023). Smart greenhouse construction and irrigation control system for optimal Brassica Juncea development. *Plos one*, 18(10), e0292971.
- Islam, Z. U., Lipu, M. S. H., Karim, T. F., Fuad, A. M., & Ali, N. (2024). Optimizing hybrid renewable energy based automated railway level crossing in Bangladesh: Techno-economic, emission and sensitivity analysis
- Jamshidi, F., Ghiasi, M., Mehrandezh, M., Wang, Z., & Paranjape, R. (2024). Optimizing Energy Consumption in Agricultural Greenhouses: A Smart Energy Management Approach. *Smart Cities*, 7(2), 859-879.
- Jung, D. H. (2020). Development of Artificial Intelligence-based Climate Control System for Smart Greenhouse. PhD Theses, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University.
- Krüger, M., Zemanek, T., Wuttke, D., Dinkel, M., & Serfling, A. (2024). Hyperspectral imaging for pest symptom detection in bell pepper
- Kurt, C., Yılmaztürk, İ., Okur, F., Menemen, A., Bahtiyar, B., & İplikçi, S. (2022). Nesnelerin İnterneti Tabanlı Tarımsal Sulama Otomasyon Sistemi Geliştirilmesi. *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 149-153.
- Kürklü, A. (2023). Climate Control and Irrigation Automation Systems in Turkish Greenhouses: A Comparative Study. *Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research*.
- Lin, F., Weng, Y., Chen, H., & Zhuang, P. (2021). Intelligent greenhouse system based on remote sensing images and machine learning promotes the efficiency of agricultural economic growth. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101758.

- Luts, P., & Kytsenko, A. (2024). Integration of sensor technologies into the structural scheme of automated greenhouse control.
- Martin, J., Ansuategi, A., Maurtua, I., Gutierrez, A., Obregón, D., Casquero, O., & Marcos, M. (2021). A generic ROS-based control architecture for pest inspection and treatment in greenhouses using a mobile manipulator. *IEEE access*, 9, 94981-94995.
- Martín-Gómez, P. F., Rangel-Díaz, J. E., Montoya-Gómez, J. O., & Rubiano-Fernández, J. L. (2019). Automation of greenhouse pesticide application: design and construction. *Visión electrónica*, 2(1), 129-133.
- Morales-García, J., Bueno-Crespo, A., Terroso-Sáenz, F., Arcas-Túnez, F., Martínez-España, R., & Cecilia, J. M. (2023). Evaluation of synthetic data generation for intelligent climate control in greenhouses. *Applied Intelligence*, 53(21), 24765-24781.
- Ortiz Zambrano, T. N. (2024). Optimización del consumo de agua en un invernadero artificial haciendo uso de machine learning y PLC.
- Panfilov, I., Boyko, A., Orlov, V., & Kukartseva, S. (2024). Designing a UML automated drip irrigation system to improve the efficiency of greenhouse agriculture.
- Park, D. H., Kang, B. J., Cho, K. R., Shin, C. S., Cho, S. E., Park, J. W., & Yang, W. M. (2011). A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network. *Wireless Personal Communications*, 56, 117-130.
- Siddiqui, M. F., Kanwal, N., Mehdi, H., Noor, A., & Khan, M. A. (2017, December). Automation and monitoring of greenhouse. In *2017 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)* (pp. 197-201). IEEE.
- Sivagami, A., Hareeshvare, U., Maheshwar, S., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Automated irrigation system for greenhouse monitoring. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 99(2), 183-191.
- Tabatabaeifar, A., Shafieian, M. A., Banizaman, H., & Ali, S. (2014). Design and implementation of a web-based Greenhouse Remote Monitoring System with Zigbee Protocol and GSM Network. *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, 5, 71-80.
- Taki, M., Mehdizadeh, S. A., Rohani, A., Rahnama, M., & Rahmati-Joneidabad, M. (2018). Applied machine learning in greenhouse

- simulation; new application and analysis. *Information processing in agriculture*, 5(2), 253-268.
- Tangarife, H. I., & Díaz, A. E. (2017, October). Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: A review. In 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC) (pp. 1-6). IEEE.
- Tarım ve Orman Bakanlığı, “Örtü altı Üretim Alanları Ve Üretim Miktarları” Erişim Tarihi: 23 Ekim 2024, <https://www.tarimorman.gov.tr/Konular/Bitkisel-Uretim/Tarla-Ve-Bahce-Bitkileri/Ortu-Altı-Yetistiricilik>
- Uğur, D. (2021). Mamdani tip bulanık mantık tabanlı sera iklim denetim sistemi tasarımı (Master's thesis, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi).
- Vadiee, A., & Martin, V. (2012). Energy management in horticultural applications through the closed greenhouse concept, state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5087-5100.
- Yılmaz, A., & Doğan, H. (2016). Sera İçi Hava Şartlarının Otomasyon Sistemi İle Üretim Kalitesinin Artırılması ile İlgili Bir Çalışma. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 6(2/2), 145-159.
- Yılmaz, C. (2017). Seralar İçin Çok Fonksiyonlu Akıllı Kontrol Sistemleri. Elimko Elektronik İmalat Ve Kontrol Ltd. Şti., Ww. Elimko. Com. Tr, Ankara.
- Zhang, X., Bu, J., Zhou, X., & Wang, X. (2023). Automatic pest identification system in the greenhouse based on deep learning and machine vision. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1255719.

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM İÇİN KALİTE YÖNETİM SİSTEMİNE DAYALI MEKANİZASYON PLANLAMASI

Doç. Dr. Ömer ERTUĞRUL¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18074357>

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü,
Kırşehir, Türkiye. oertugrul@ahievran.edu.tr, orcid id: 0000-0003-0774-1728

1. GİRİŞ

Tarımsal üretim sistemleri, artan küresel gıda talebi ve daralan doğal kaynaklar kıskacında, verimlilik ile çevresel koruma arasında hassas bir denge kurmak zorundadır (Unver, 2015). Bu dengenin sağlanmasında en kritik araçlardan biri olan tarımsal mekanizasyon, doğru yönetilmediği takdirde toprak degradasyonu, yüksek karbon emisyonları ve enerji israfı gibi önemli negatif dışsallıklara yol açabilmektedir (Fluck, 1992; Pimentel & Pimentel, 2008; Evrendilek, 2002). Geleneksel mekanizasyon planlaması genellikle makine kapasitesi, iş başarısı ve ilk yatırım maliyeti gibi teknik parametrelere odaklanırken; günümüzün sürdürülebilirlik paradigması, bu yaklaşımın ötesine geçilmesini ve süreç odaklı, risk temelli ve ölçülebilir bir yönetim anlayışının benimsenmesini zorunlu kılmaktadır (Bochtis ve ark., 2014).

Bu çerçevede sürdürülebilirlik, yalnızca çevresel bir hedef değil; aynı zamanda maliyet belirsizliğini azaltma, regülasyonlara uyumu güçlendirme ve pazarlara erişimde kurumsal dayanıklılığı artırma aracı olarak da konumlanmaktadır (Bernardo ve ark., 2009; Smihunova ve ark., 2024). Nitekim su-enerji-gıda (WEF) etkileşimlerini esas alan çalışmalar, iklim değişikliği, kentleşme ve su kaynaklarının azalmasının tarımsal üretim üzerinde ciddi yapısal baskılar oluşturduğunu göstermektedir (Degirmencioglu ve ark., 2019; Ertuğrul ve ark., 2022). Örneğin, Türkiye'deki Gediz Havzası'nda yapılan bir analiz, kentleşme nedeniyle arazi mevcudiyetinin azalmasının ve iklim değişikliğinin yol açtığı su kıtlığının kaçınılmaz olduğunu ortaya koymuştur (Degirmencioglu ve ark., 2019). Bu koşullar altında, enerji kullanımını azaltmak için doğrudan ekim gibi yeni çiftçilik uygulamaları ve su tasarrufu sağlamak için damla sulama sistemlerinin seçilmesi gerekmektedir (Degirmencioglu ve ark., 2019; Ertuğrul ve ark., 2022). Bu tür önlemler, su kıtlığı ve çevresel kısıtlamaların gelecekte daha da yoğunlaşacağı düşünüldüğünde öncelikli hale gelmektedir (Rodriguez Sinobas, 2014).

Bu çalışmanın temel amacı, tarımsal mekanizasyonu yalnızca “satın alma ve kullanma” ekseninde ele alan dar yaklaşımdan kurtararak, “planla, yönet, ölç ve sürekli iyileştir” (PUKÖ) döngüsüne dayalı bütüncül bir yönetim sürecine dönüştürmektir (Deming, 1986). Bu amaçla, ISO 9001 (Kalite), ISO 14001 (Çevre), ISO 45001 (İş Sağlığı ve Güvenliği) ve enerji yoğun tarım sektörü açısından kritik öneme sahip ISO 50001 (Enerji) standartlarının, EFQM Mükemmellik Modeli çatısı altında tarımsal mekanizasyon planlamasına nasıl entegre edilebileceği kavramsal bir çerçevede tartışılmaktadır (EFQM, 2020; ISO, 2015a, 2015b, 2018a, 2018b). Bu entegre yaklaşım, işletmelerin çevresel sürdürülebilirliği desteklerken, operasyonel verimlilik ve rekabet gücü

kazanmalarına olanak tanımayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, tarımsal mekanizasyonun planlanması ve yönetimi, yalnızca teknik uygunluk veya ekonomik fizibilite kriterleriyle sınırlandırılmamalı, mekanizasyon kararlarının; enerji verimliliği, çevresel etkiler, iş sağlığı ve güvenliği riskleri ile uzun vadeli kurumsal performans üzerindeki etkileri eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle, endüstriyel sektörlerde başarıyla uygulanan entegre yönetim sistemlerinin tarımsal mekanizasyon süreçlerine uyarlanması, yalnızca bir iyileştirme aracı değil; iklim değişikliği, kaynak kısıtları ve artan rekabet baskıları karşısında tarımsal işletmelerin dayanıklılığını artıran stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Deming, 1986; EFQM, 2020).

2. SÜRDÜRÜLEBİLİR MEKANİZASYON VE YÖNETİM PARADİGMASI

Sürdürülebilir tarımsal mekanizasyon, uygun teknolojinin çevre dostu, ekonomik olarak erişilebilir ve sosyal açıdan kabul edilebilir biçimde uygulanmasını ifade eder. Ancak bu tanım, traktör gücü, toprak işleme yoğunluğu, makine yenileme periyotları ve ekipman uyumu gibi çok boyutlu ve karmaşık karar süreçlerini beraberinde getirir; bu kararların günümüzde yalnızca mühendislik hesaplamalarına dayalı sezgisel yaklaşımlarla sağlıklı biçimde verilemeyeceği aşikardır (Bowers & Hunt, 1970).

Geleneksel sezgisel yönetim anlayışının, iklim değişikliği ve ekonomik dalgalanmaların yarattığı yüksek belirsizlik ortamında yetersiz kalması, sistematik yönetim yaklaşımlarını bir zorunluluk haline getirmiştir (Deming, 1986). Bu noktada kalite yönetim sistemleri (KYS), karmaşık değişkenler arasındaki nedensellik ilişkilerini görünür kılarak, karar vericilerin subjektif hatalarını minimize eden bir yönetim “emniyet sübabı” işlevi görmektedir (Oakland, 2014). KYS'nin tarımsal işletmelere adaptasyonu, süreç yaklaşımını benimseyerek, girdilerin çıktılara dönüşümünü sadece teknik performans açısından değil, çevresel etki, enerji kullanımı ve iş güvenliği boyutlarıyla birlikte değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır (Smihunova ve ark., 2024). KYS'nin geliştirilmesi, sertifikasyonu ve kapasite halinde sürdürülmesi, işletmelerin verimliliğini, ekonomik etkinliğini ve hem ulusal hem de küresel pazarlarda rekabet gücünü önemli ölçüde artıran stratejik yönelimlerdir (Pavlova ve ark., 2022).

Buna ek olarak, mekanizasyon düzeyinin yalnızca makine sayısı veya ortalama traktör gücü gibi göstergelerle değil; arazi yapısı, parsel büyüklüğü, erişilebilirlik ve mekânsal dağılım gibi unsurlarla birlikte değerlendirilmesi gerekir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı analizler, mekanizasyon

göstergelerinin bölgesel farklılıklarını ortaya koyarak planlama süreçlerine karar-destek katkısı sunar (Özgünaltay-Ertugrul ve ark., 2019). Örneğin, Kırşehir ilinde 2006–2015 yılları arasındaki verilerle yapılan bir çalışma, ortalama traktör gücünün 40.82 kW olduğunu ve traktör başına düşen ortalama işlenen alanın 53.16 ha olduğunu belirlemiştir; bölgenin mekanizasyon seviyesinin ülke ortalamasının gerisinde olduğunu ortaya koymuştur (Özgünaltay-Ertugrul ve ark., 2019). Bu tür detaylı veri tabanlarının oluşturulması, planlamaya dayalı uygulamalar için temel bir model oluşturur (Özgünaltay-Ertugrul ve ark., 2019). Arazi toplulaştırmasının mekanizasyon göstergelerini iyileştirdiğine ilişkin bulgular da, planlamanın “tarımsal yapı” politikalarıyla eşgüdüm içinde yürütülmesi gerektiğini göstermektedir (Alkan & Ertugrul, 2025).

3. MEKANİZASYON YÖNETİMİNDE ENTEGRE SİSTEMLER

Tarımsal işletmelerde mekanizasyonun etkin biçimde yönetilebilmesi için önerilen entegre yapı, kalite, çevre, iş sağlığı ve güvenliği ile enerji yönetim sistemlerinin eş zamanlı ve uyumlu biçimde uygulanmasına dayanmaktadır (Karapetrovic & Willborn, 1998). Bu entegrasyon, mekanizasyonun “teknik bir faaliyet” olmaktan çıkarılıp, kurumsal süreç yönetimi ve sürekli performans iyileştirme hedeflerine bağlanmasını sağlar.

3.1. ISO 9001: Operasyonel Kalite ve Standardizasyon

ISO 9001 standardı, mekanizasyon süreçlerinde yapılan işlerin doğruluğunu, tutarlılığını ve izlenebilirliğini güvence altına alır (ISO, 2015a). Tarımsal işlemlerde makine ayarlarının, kalibrasyon prosedürlerinin ve uygulama yöntemlerinin standartlaştırılması, operasyonel değişkenliğin azaltılmasını sağlar (ISO, 2015a). Standardizasyonun sağlanmadığı durumlarda ortaya çıkan operasyonel sapmalar, ürün kalitesinde dalgalanmalara yol açmakta ve öngörülemeyen maliyet artışlarına neden olmaktadır (Liu ve ark., 2021).

ISO 9001, tarım-gıda firmaları için tedarik zinciri yönetiminde faydalar sunar ve izleme prosedürlerinin resmileştirilmesine yardımcı olurken; planlama, tedarik, üretim ve teslimat verimliliğini artırmaktadır (Wilcock & Boys, 2017). Hem sertifikalı hem de sertifikasız firmalar, ISO 9001 sayesinde müşteri memnuniyetinde, pazar payında ve stok devir hızında artış, geri dönüşüm, atık ve müşteri şikayetlerinde ise azalma bildirmişlerdir (Wilcock & Boys, 2017). Çin imalat sanayisinde yapılan araştırmalar, ISO 9000/ödülleri

alan firmaların, operasyonel etkinlik ve karlılık açısından avantajlar elde ettiğini, ancak satış büyümesi ve inovasyon kabiliyetinde beklenen artışı yakalayamadığını göstermiştir (Liu ve ark., 2021; Liu ve ark., 2020). Güney Afrika imalat sanayisinde ise yüksek uygulama maliyetlerine rağmen (Ramdass & Nemavhola, 2018; Ramdass & Nemavhola, 2018), iyi korunan ISO Kalite Yönetim Sistemleri'nin kalite maliyetlerini azalttığı ve örgütsel etkinliği artırdığı, böylece şirketlerin uluslararası alanda rekabetçi hale geldiği belirtilmiştir (Ramdass & Nemavhola, 2018; Ramdass & Nemavhola, 2018). Bulgaristan'daki işletmeler de ISO 9001 sertifikasyonu sayesinde ekonomik faydalar ve rekabet avantajları elde etmektedir (Ilieva, 2019). ISO 9001'in ulaşım şirketlerine uygulanmasıyla ise aktif karlılığı ve satış karlılığı gibi göstergelerde sertifikasyon sonrası dönemde belirgin pozitif farklar gözlemlenmiştir (Czödöröová & Gnap, 2023). Küçük işletmelerde ISO 9001:2015 sertifikası almanın daha iyi verimlilik, daha az atık ve daha yüksek kar getirmesi beklenmektedir (Hyer & Tang, 2024).

3.2. ISO 14001: Çevresel Etki ve Yaşam Döngüsü Yönetimi

ISO 14001, mekanizasyon faaliyetlerinin çevresel etkilerinin sistematik biçimde tanımlanmasını, izlenmesini ve azaltılmasını hedefler (ISO, 2015b). Bu standardın uygulanması, giderek sıkılaştıran çevre regülasyonlarına ve karbon vergilerine karşı işletmeye yasal ve finansal bir koruma sağlamaktadır (Bernardo ve ark., 2009). Mekanizasyon bağlamında egzoz emisyonları, atık yağlar, filtre/lastik atıkları ve gürültü gibi unsurların izlenmesi ve uygun bertaraf/azaltım planlarının oluşturulması ISO 14001'in temel uygulama alanlarıdır.

ISO 14001'in benimsenmesi, doğal kaynakları korumaya yardımcı olur ve sürdürülebilir operasyonlarla kalite yönetimini birleştiren olumlu bir eğilimi yansıtır (Smihunova ve ark., 2024). ISO 9001 ve ISO 14001 standartlarının faydaları arasında büyük bir örtüşme olduğu, her iki standardın da operasyonel, insan kaynağı ve müşteri sonuçları üzerinde açık faydalar sağladığı, ancak finansal performans üzerindeki etkilerinin belirsiz olduğu belirtilmiştir (Tarí ve ark., 2012).

3.3. ISO 45001: İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG)

Tarım sektörü, istihdam büyüklüğü açısından dünyanın en büyük ikinci sektörü olmasına rağmen, iş sağlığı ve güvenliği bakımından en riskli sektörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Özgünaltay Ertuğrul ve ark., 2022; Svendsen ve ark., 2014). İş kazalarında yaşamını yitiren çalışanların azımsanamayacak bir bölümünü tarım işçileri oluşturmaktadır (Rorat ve ark.,

2015; CDC-NIOSH, 2018). ISO 45001 standardı, mekanizasyon kaynaklı risklerin proaktif biçimde yönetilmesini hedefler (ISO, 2018a). İSG'nin ekonomik gerekçesi, kaza sonrası ortaya çıkan doğrudan maliyetlerin yanı sıra, üretim kayıpları ve kurumsal itibar üzerindeki dolaylı olumsuz etkileri azaltmaktır.

Türkiye örneğinde tarım sektöründe yaşanan kazaların çoğunluğunun traktör ve tarım makineleri ile gerçekleştiği, tarımsal iş kazalarının dörtte üçünün ve ölümlü kazaların üçte birinin traktör kaynaklı olduğu belirtilmiştir (Özgünlaltay Ertuğrul ve ark., 2022; Abubakar ve ark., 2010). Ölümcül kazalara en sık rastlanan durum/olay ikilisi, taşıma esnasında traktörün devrilmesidir (Bernik & Jeroncic, 2011; CDC-NIOSH, 2018). Traktörün yüksek ağırlık merkezi, sürücünün eğitim/deneyim yetersizliği (Bernik & Jeroncic, 2008) ve özellikle ekonomik ömrünü doldurmuş yaşlı traktörlerden oluşan parkın (Evcim & Özgünlaltay Ertuğrul, 2017) riskleri artırdığı çalışmalarla gösterilmiştir (Özgünlaltay Ertuğrul ve ark., 2022). Bu durum, İSG risklerinin azaltılması için planlı yenileme ve operatör yetkinliğinin güçlendirilmesinin kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Özgünlaltay Ertuğrul ve ark., 2022). Traktörlerin yıllık kullanım sürelerine ilişkin veriler (Türkiye ortalaması 443 saat) (Evcim & Özgünlaltay Ertuğrul, 2017), bakım-onarım ve yenileme planlamasının veri temelli yapılmasının gerekliliğini desteklemektedir (Özgünlaltay Ertuğrul, 2025).

İSG'nin modern uygulamalarında dijitalleşme de önem kazanmaktadır. Tarım makineleri üretim/bakım ortamlarında yapay zekâ (YZ) temelli kişisel koruyucu donanım (baret) tespiti gibi uygulamalar, denetim etkinliğini artırarak insan hatasını azaltma potansiyeli taşımaktadır (Özüağ & Ertuğrul, 2024).

3.4. ISO 50001: Enerji Yönetimi ve Verimlilik

Tarımsal mekanizasyon, fosil yakıt ve elektrik enerjisinin yoğun kullanıldığı bir üretim alanıdır. ISO 50001 standardı, enerji yönetimini işletmenin kârlılığını ve rekabet gücünü doğrudan etkileyen stratejik bir unsur haline getirmektedir (ISO, 2018b). Enerji performans göstergeleri (EnPI) ve referans çizgileri, mekanizasyon planlamasında objektif karar alma sürecini desteklemektedir (Moitzi ve ark., 2014).

Enerji boyutunun yalnızca “tüketim” olarak değil, aynı zamanda “yenilenebilir enerji katkısı” olarak da değerlendirilmesi sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Tarımsal atık ve artıkların (fındık/ceviz artıkları gibi) enerjiye dönüştürülmesine yönelik çalışmalar, uygun dönüşüm teknolojileriyle enerji bilançolarının iyileştirilebileceğini ve çevresel yüklerin azaltılabileceğini

göstermektedir (Ertuğrul ve ark., 2024; Kuru & Ertuğrul, 2024; Ertuğrul, 2025). Bu yaklaşım, ISO 50001 kapsamında enerji verimliliği projeleri ile birlikte değerlendirildiğinde, işletme düzeyinde döngüsel ekonomi mantığını da güçlendirebilir.

3.5. EFQM Mükemmellik Modeli: Stratejik Çatı

EFQM Mükemmellik Modeli, tüm bu yönetim sistemlerini liderlik, strateji ve paydaş odaklılık ekseninde bütüncül bir çatı altında birleştirmektedir (EFQM, 2020). EFQM yaklaşımı; mekanizasyon yatırımlarının sadece teknik kapasiteyi değil, aynı zamanda inovasyon, dijitalleşme, çalışan güvenliği, çevre performansı ve paydaş beklentilerini birlikte karşılamasını hedefler. Modelin başarısı, üst yönetim taahhüdünün yanı sıra, kurum kültürünün sürekli iyileştirme anlayışını içselleştirmesine ve uygulama direncinin yönetilmesine bağlıdır (Oakland, 2014). Sürekli iyileştirme kültürü, şirketleri modern üretim zorluklarıyla başa çıkma konusunda güçlendiren temel bir faktördür (Smihunova ve ark., 2024).

4. KAVRAMSAL ÇERÇEVE: SÜRDÜRÜLEBİLİR MEKANİZASYON YÖNETİM MODELİ (SMYM)

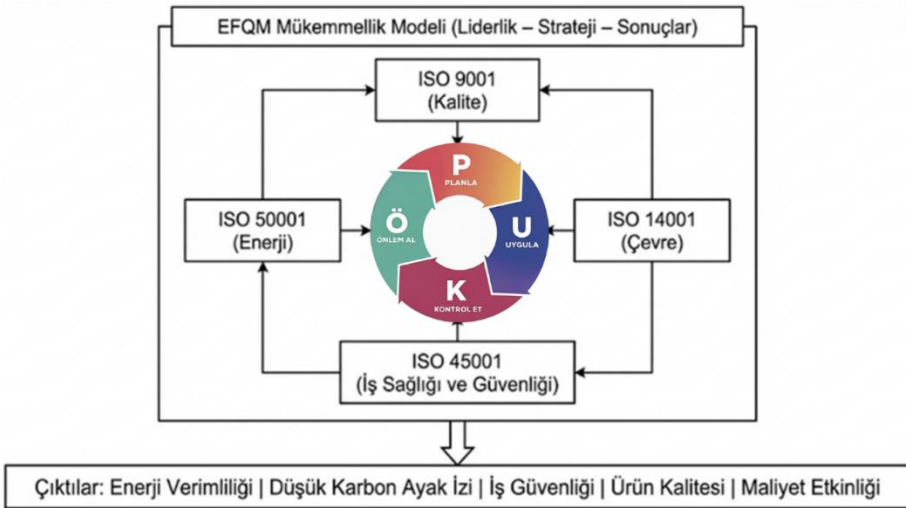
Önerilen Sürdürülebilir Mekanizasyon Yönetim Modeli (SMYM), sürekli iyileştirmeyi temel alan PUKÖ (Planla-Uygula-Kontrol Et-Önlem Al) döngüsü üzerine inşa edilmiştir (Deming, 1986). Statik planlama yaklaşımlarının aksine, bu dinamik yapı sahadan sürekli elde edilen verilerle beslendiğinde, işletmenin değişen ekolojik ve ekonomik koşullara çevik biçimde uyum sağlamasına olanak tanımaktadır. KYS'nin geliştirilmesi ve sürdürülmesi, işletmelerin verimliliğini ve rekabet gücünü önemli ölçüde artıran stratejik bir yöndür (Pavlova ve ark., 2022).

SMYM'nin temel bileşenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Stratejik Girdiler (Planlama Fazı):** İşletme hedefleri, ulusal/uluslararası mevzuat ve standartlar (ISO 9001, 14001, 45001, 50001), mevcut kaynaklar (makine parkı, insan kaynağı) ve paydaş beklentileri (müşteri, çevre) bu fazın temelini oluşturur (EFQM, 2020; ISO, 2015a, 2015b, 2018a, 2018b).
- **Süreç Yönetimi (Uygulama Fazı):** Risk-fırsat analizinin yapılması, Standart Operasyon Prosedürlerinin (SOP) ve kalibrasyon yönetmeliklerinin oluşturulması, önleyici bakım planlaması, operatör eğitimi ve tedarikçi yönetiminin standardizasyonu bu aşamada kritik öneme sahiptir (ISO, 2015a; ISO, 2018a).

- **İzleme ve Ölçme (Kontrol Et Fazı):** Enerji performans göstergeleri (EnPI), çevresel boyutların takibi, ürün kalitesi sonuçları ve İSG göstergeleri gibi metrikler sürekli olarak ölçülür ve izlenir (ISO, 2015b; ISO, 2018b; Moitzi ve ark., 2014). Bu faz, mekanizasyonun yalnızca ekonomik değil, çevresel ve sosyal performansını da değerlendirmeyi sağlar.
- **İyileştirme (Önlem Al Fazı):** Ölçüm sonuçlarına göre düzeltici ve önleyici faaliyetlerin planlanması, teknoloji güncellemelerinin yapılması ve bu süreçlerle işletmenin öğrenen bir organizasyon haline gelmesi hedeflenir (Deming, 1986; Oakland, 2014).

Ayrıca, SMYM çatısı altındaki mekanizasyon hedefleri, toprak sağlığı, karbon dengesi ve uzun vadeli üretkenlik gibi sürdürülebilirlik unsurlarıyla doğrudan ilişkilidir. Rejeneratif tarım uygulamalarına yönelik mekanizasyon yaklaşımları, azaltılmış toprak işleme veya doğrudan ekim gibi uygulamaların planlı yönetiminin toprak sağlığı ve genel sürdürülebilirlik için hayati olduğunu vurgulamaktadır (Ertuğrul, 2023).



Şekil 1. Sürdürülebilir Mekanizasyon Yönetim Modeli (SMYM): PUKÖ döngüsü, ISO yönetim sistemleri ve EFQM çerçevesinin entegrasyonu

5. MEKANİZASYON SÜREÇLERİNİN ENTEGRE YÖNETİMİ

Kavramsal çerçevenin başarılı bir şekilde uygulamaya aktarılması, mekanizasyonun tüm yaşam döngüsü aşamalarında (tedarikten yenilemeye kadar) entegre yönetim standartlarının eş zamanlı uygulanmasını

gerektirmektedir. Her karar aşaması, PUKÖ döngüsü içinde izlenebilir performans göstergeleriyle yönetilmelidir.

5.1. Tedarik ve Yatırım Planlaması

Makine yatırımlarında yalnızca ilk satın alma maliyetine odaklanmak, uzun vadede ortaya çıkan enerji verimsizliği ve operasyonel kayıplar biçimindeki gizli maliyetleri maskeleymektedir (Bochtis ve ark., 2014). Bu nedenle, yatırım karar süreci, makinenin toplam sahip olma maliyetini ve ISO 14001/50001 standartlarının gerektirdiği çevresel yaşam döngüsü etkilerini içerecek şekilde yeniden yapılandırılmalıdır (ISO, 2015b; ISO, 2018b). Arazi toplulaştırması gibi yapısal düzenlemelerin, daha güçlü ve etkin makine kullanımını teşvik ettiğine ilişkin bulgular, yatırım planlamasında ***“arazi yapısı-mekanizasyon uyumu”***nun da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Alkan & Ertuğrul, 2025).

5.2. İşletme ve Bakım Yönetimi

Veriye dayalı bakım protokollerinin eksikliği, makine kullanılabilirliğini düşürmekte ve plansız duruşlar özellikle hasat dönemlerinde ciddi zaman ve ürün kayıplarına yol açmaktadır (Fluck, 1992). ISO 9001 kapsamında bakım ve kalibrasyon kayıtlarının standardizasyonu ve izlenebilirliği (ISO, 2015a); ISO 50001 kapsamında ise enerji verimliliğini koruyacak bakım stratejilerinin oluşturulması kritik önemdedir (ISO, 2018b).

Bakım/onarım ve ekipman depolama süreçlerinde 5S metodolojisinin (Sınıflandırma, Düzenleme, Temizlik, Standartlaştırma, Sürdürme) kullanılması, güvenlik ve verimlilik kazanımlarını artırabilir. 5S'in tarımsal üretim ve destek süreçlerinde uygulanmasına ilişkin bir çalışma, özellikle bakım-onarım ve ekipman organizasyonu alanlarında önemli iyileştirme potansiyeline işaret etmektedir. 5S metodolojisi, aynı zamanda atıkların azaltılmasına, iş güvenliğinin artırılmasına ve makine ömrünün uzatılmasına yardımcı olarak Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) ile de uyum sağlamaktadır (Özgünaltay Ertuğrul ve ark., 2025). Ayrıca İSG perspektifinden, yapay zekâ temelli kişisel koruyucu donanım (baret) tespiti gibi dijital araçlarla desteklenen kontrol sistemleri, denetim etkinliğini artırarak insan hatasını azaltma potansiyeli taşımaktadır (Özüağ & Ertuğrul, 2024).

5.3. Ekonomik Ömür ve Yenileme

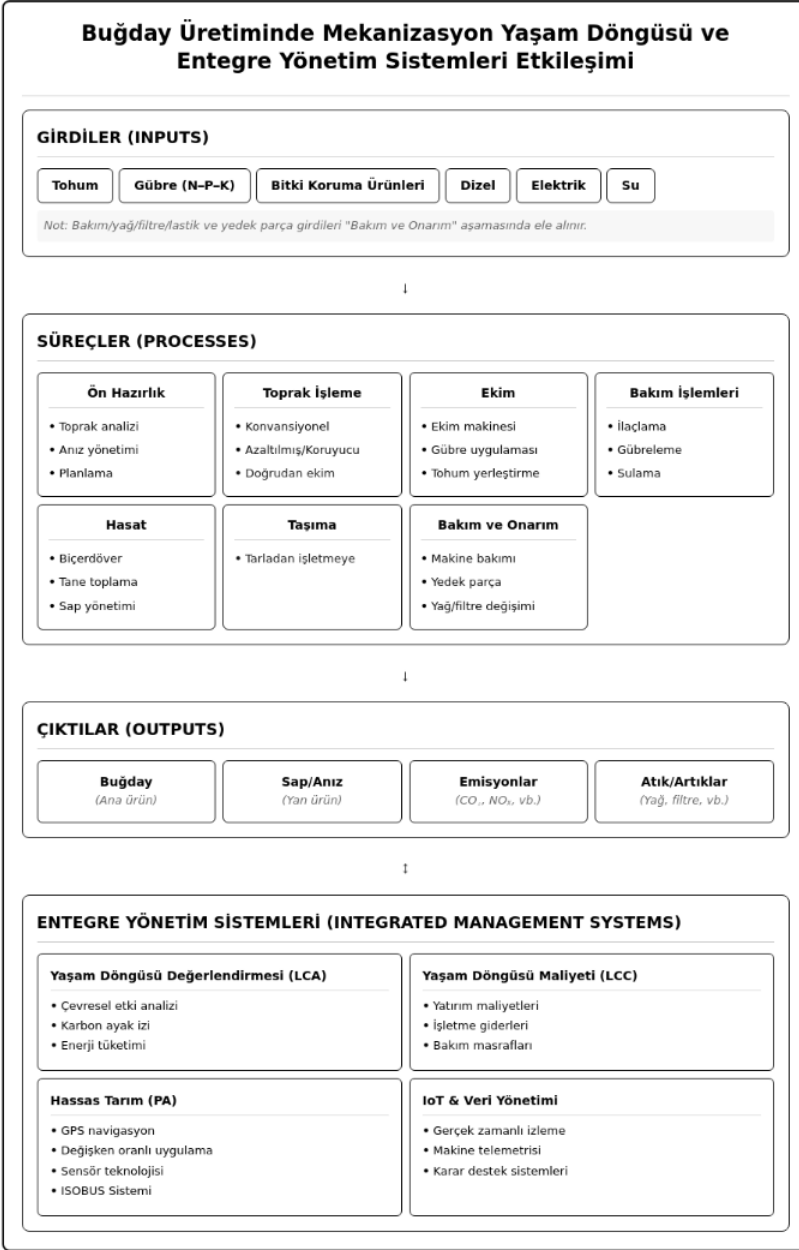
Teknolojik eskimenin getirdiği verimlilik kayıpları, makine yenileme kararlarında mekanik yıpranma kadar belirleyici bir faktör olarak dikkate

alınmalıdır (Moitzi ve ark., 2014). Yenileme kararının veri temelli verilmesi; enerji performansındaki bozulma (EnPI), bakım maliyetlerindeki artış, arıza sıklığı ve güvenlik göstergeleri gibi metriklerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir (ISO, 2018a; ISO, 2018b). Türkiye'deki traktör parkının yarısından fazlasının ekonomik ömrünü doldurmuş yaşlı traktörlerden oluşması, yakıt ve bakım masraflarını artırmakta, verim ve kalitede kayıplara yol açmakta ve kaza riskini yükseltmektedir (Evcim & Özgünaltay Ertuğrul, 2017; Özgünaltay Ertuğrul ve ark., 2022). Ülke genelinde yıllık kullanım süresi ortalama 443 saat olarak belirlenmiştir (Evcim & Özgünaltay Ertuğrul, 2017). İç Anadolu Bölgesi'nde Kırşehir ve Yozgat'ı kapsayan güncel bir analiz ise, yıllık kullanım sürelerinde büyük farklılıklar (bazı traktörler yılda 100 saatin altında, bazıları ise 2000 saati aşan) olduğunu göstermiştir (Özgünaltay Ertuğrul, 2025). Bu yüksek varyasyon, traktörlerin bazı işletmelerde çok yoğun kullanıldığını, diğerlerinde ise sınırlı faaliyetlerde görev yaptığını göstermektedir (Özgünaltay Ertuğrul, 2025). Özellikle yüksek kullanım sürelerine sahip traktörlerin ortak kullanıldığı (müteahhitlik hizmetleri, makine kooperatifleri gibi) düşünülmektedir (Özgünaltay Ertuğrul, 2025).

5.4. Dijitalleşme ve Hassas Tarım Entegrasyonu

Tarım 4.0 uygulamaları (sensörler, telemetri, karar destek sistemleri ve büyük veri) sayesinde, mekanizasyon yönetiminde ölçüm-izleme kapasitesi artmakta ve PUKÖ döngüsü hızlanmaktadır (Wolfert ve ark., 2017). Hassas tarım (Tarım 3.0) döneminde CBS teknolojisi kullanılarak gübreleme gibi süreçler izlenmeye başlanmış, Tarım 4.0 (Dijital Tarım) döneminde ise akıllı ağlarla veri yönetimi otomasyonlar üzerinden sağlanmıştır (Alkan & Ertuğrul, 2022). Akıllı tarımın temel hedefleri, giderleri azaltarak çevreyi korumak, verimli ve kaliteli ürünler elde etmek ve işletmeye yönelik kararlar için etkin bilgi akışı sağlamaktır (Sayıncı ve ark., 2020; Alkan & Ertuğrul, 2022). Özellikle tarımsal insansız hava araçları (TİHA) ile pestisit uygulamalarına ilişkin çalışmalar, girdi optimizasyonu ve operasyonel etkinlik açısından teknoloji tabanlı dönüşümün önemini göstermektedir (Alkan & Ertuğrul, 2022). TİHA kullanımı, düşük yakıt tüketimiyle girdi maliyetlerini azaltması ve değişken düzeyli uygulama ile çevresel zararı minimize etmesi gibi avantajlar sunar. Bu tür uygulamalar, hem ISO 9001'in standardizasyon/izlenebilirlik yaklaşımı hem de ISO 14001'in çevresel etkileri azaltma hedeflerini aynı anda destekleyebilir (ISO, 2015a, 2015b; Alkan & Ertuğrul, 2022). Dijitalleşme, tarımsal mekanizasyon dışında hayvancılık sektöründe de İSG ve verimliliği artırmaktadır. YZ tabanlı bireysel sığır yüz tanıma sistemleri, geleneksel kulak

küpesi kaybı sorununu çözerek hayvan refahını ve sürü yönetimini iyileştirmektedir (Polat ve ark., 2025). Derin öğrenme algoritmalarından DenseNet201, sığır yüzlerini tanıma konusunda %99.53 gibi yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır (Polat ve ark., 2025). Bu sistemler, gelecekte yem tüketimi, canlı ağırlık ve hastalıklar gibi hayati parametrelerin hızlı bir şekilde belirlenmesini mümkün kılarak daha verimli ve sürdürülebilir hayvancılık uygulamalarına kapı açacaktır (Polat ve ark., 2025).



Şekil 2. Tarımsal mekanizasyonun yaşam döngüsü ve entegre yönetim sistemleri etkileşimi (buğday örneği)

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Sürdürülebilir tarım için mekanizasyon planlaması, tek boyutlu teknik hesaplamalardan uzaklaşarak, kalite yönetim sistemlerine dayalı, çok

parametrelili ve dinamik bir süreç gerektirmektedir. Bu çalışmada sunulan entegre yönetim yaklaşımı, mekanizasyonu işletmenin sürdürülebilirlik ve rekabet performansını belirleyen stratejik bir yönetim süreci haline getirmektedir (EFQM, 2020; ISO, 2015a, 2015b, 2018a, 2018b).

Kalite Yönetim Sistemleri (ISO 9001, 14001, 45001, 50001) ve EFQM çatısı altında, operasyonel standardizasyon sağlanmakta, çevresel etkiler kontrol altına alınmakta, iş güvenliği riskleri proaktif olarak yönetilmekte ve enerji verimliliği artırılmaktadır. Özellikle ISO 9001, tarım-gıda firmaları için tedarik zinciri yönetimini, müşteri memnuniyetini ve operasyonel verimliliği artırırken (Wilcock & Boys, 2017); ISO 45001, yaşanan traktör parkı ve yetersiz eğitimden kaynaklanan yüksek kaza riskinin yönetilmesinde kritik rol oynamaktadır (Özgünlaltay Ertuğrul ve ark., 2022; Evcim & Özgünlaltay Ertuğrul, 2017). Bu, planlı yenileme ve 5S metodolojisi gibi yalın yönetim tekniklerinin uygulanmasıyla desteklenmelidir (Özgünlaltay Ertuğrul ve ark., 2025).

Entegre yönetim, Su-Enerji-Gıda (WEF) etkileşimleri perspektifini güçlendiren uygulamaları teşvik etmektedir. Doğrudan ekim ve damla sulama gibi uygulamalar enerji ve su tasarrufunu sağlarken (Degirmencioglu ve ark., 2019; Ertuğrul ve ark., 2022), tarımsal atıkların (fındık/ceviz artıkları gibi) enerji bilançolarına yenilenebilir katkı olarak entegre edilmesi (Ertuğrul ve ark., 2024; Kuru & Ertuğrul, 2024; Ertuğrul, 2025), çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğin eş zamanlı sağlanabileceğini göstermektedir. Yatırım planlamasında sadece ilk maliyete değil, toplam sahip olma maliyetine ve arazi toplulaştırması gibi yapısal düzenlemelerle uyuma odaklanması gerekmektedir (Bochtis ve ark., 2014; Alkan & Ertuğrul, 2025).

Modelin sahadaki başarısı, Dijital Tarım 4.0 uygulamalarına ve bu uygulamaların sağladığı büyük verinin (sensörler, telemetri, TİHA'lar, YZ tabanlı yüz tanıma) etkin kullanımına bağlıdır (Wolfert ve ark., 2017; Polat ve ark., 2025). Ancak, bu dönüşümün gerçekleşmesi, aynı zamanda dijital altyapı, veri okuryazarlığı ve nitelikli insan kaynağının geliştirilmesine doğrudan bağlıdır (Wolfert ve ark., 2017). Bu bağlamda, tarımsal işletmelerin kalite yönetimini benimsemesi, sadece teknik bir uyum değil, aynı zamanda sürekli öğrenen ve çevresel/ekonomik zorluklara hızla uyum sağlayan bir organizasyon yapısı oluşturma yolunda stratejik bir gerekliliktir.

KAYNAKÇA

- Alkan, B., & Özgünaltay Ertuğrul, G. (2022). Tarımsal insansız hava araçları ile pestisit uygulamaları. *Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2(2), 232–238.
- Alkan, B., & Özgünaltay Ertuğrul, G. (2025). Evaluating the relationship between land consolidation and agricultural mechanization: Evidence from a case study in Türkiye. *Sustainability*, 17(24), 11039.
- Abubakar, M. S., Ahmad, D., & Akande, F. B. (2010). A review of farm tractor overturning accidents and safety. *J. Appl. Sci. Technol.*, 10(1), 1–11.
- Bernardo, M., Casadesús, M., Karapetrovic, S., & Heras, I. (2009). How integrated are environmental, quality and other standardized management systems? An empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 742–750.
- Bernik, R., & Jeroncic, R. (2008). *Causes of accidents with the agricultural and forestry tractors*. In International Conference of Agricultural Engineering.
- Bernik, R., & Jeroncic, R. (2011). The comparison of number of deaths in accidents with the agriculture and forestry tractors among European countries. *Annals of Dunarea de Jos University of Galati, Fascicle V, Technologies in Chemistry, Food Science and Environment*, 34(2), 27–34.
- Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems engineering*, 126, 69-81.
- Bowers, W., & Hunt, D. (1970). Application of mathematical models to farm machinery selection. *Transactions of the ASAE*, 13(3), 363–368.
- Czódorová, R., & Gnap, J. (2023). Investigation of the effectiveness of the introduction of the quality management system according to the ISO 9001 standard in transport companies: Slovakia case study. *Sustainability*, 15(3), 2097.
- CDC-NIOSH. (2018). *National Institute for Occupational Safety and Health*.
- Degirmencioglu, A., Mohtar, R. H., Daher, B. T., Özgünaltay-Ertuğrul, G., & Ertuğrul, Ö. (2019). Assessing the sustainability of crop production in the Gediz Basin, Turkey: A water, energy, and food nexus approach. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(4), 2511–2522.

- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. MIT Press.
- EFQM. (2020). *The EFQM model*. European Foundation for Quality Management.
- Ertuğrul, Ö. (2023). A review on the mechanization practices for regenerative agriculture and the related mechanization practices. In A. Kazankaya & M. A. Ateş (Eds.), *Advance concepts on natural and agricultural sciences* (pp. 295–309). Iksad Publishing House.
- Ertuğrul, Ö. (2025). Determination of energy production potential from walnut (*Juglans regia* L.) residues in Kırşehir Province: Kırşehir ili ceviz artıklarından enerji üretim potansiyeli. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 13(3), 581–586.
- Ertuğrul, Ö., Daher, B., Özgünaltay Ertuğrul, G., & Mohtar, R. (2024). From agricultural waste to energy: Assessing the bioenergy potential of South-Central Texas. *Energies*, 17(4), 802.
- Ertuğrul, Ö., Özgünaltay-Ertuğrul, G., & Değirmencioğlu, A. (2022). Su, enerji ve gıda kaynaklarının ilişkisi ve sürdürülebilir tarımdaki yeri. In *Ziraat ve su ürünlerinde kavramsal ve olgusal yaklaşımlar* (pp. 171–177). Akademisyen Kitabevi.
- Evcim, H. Ü., & Özgünaltay-Ertuğrul, G. (2017). Türkiye tarımında traktör kullanımı (2010). *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 13(1), 21–31.
- Evrendilek, F. (2002). Agricultural sustainability in Turkey: integrating food, environmental and energy securities. *Land Degradation & Development*, 13(1), 61-67.
- Fluck, R. C. (1992). *Energy in farm production*. Elsevier.
- Hyer, L., & Tang, H. (2024). Return on investment for small businesses that obtain ISO 9001:2015 certification. *International Journal of Productivity and Quality Management*.
- Ilieva, L. M. (2019). Economic benefits for Bulgarian enterprises from the implementation and certification of a quality management system. *Eastern Academic Journal*, 1, 1-21.
- International Organization for Standardization. (2015a). *ISO 9001:2015 Quality management systems—Requirements*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2015b). *ISO 14001:2015 Environmental management systems—Requirements with guidance for use*. ISO.

- International Organization for Standardization. (2018a). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018b). *ISO 50001:2018 Energy management systems—Requirements with guidance for use*. ISO.
- Karapetrovic, S., & Willborn, W. (1998). Integration of quality and environmental management systems. *The TQM Magazine*, 10(3), 204–213.
- Kuru, E. B., & Ertuğrul, Ö. (2024). Determination of the energy potential of hazelnut residues in Ordu, Türkiye. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 11(4), 668–675.
- Liu, H., Wu, S., Zhong, C., & Liu, Y. (2021). An empirical exploration of quality management practices and firm performance from Chinese manufacturing industry. *Total Quality Management & Business Excellence*, 32(15-16), 1694-1712.
- Liu, H., Wu, S., Zhong, C., & Liu, Y. (2020). *The Sustainable Effect of Operational Performance on Financial Benefits: Evidence from Chinese Quality Awards Winners. Sustainability*, 12 (5), 1966.
- Moitzi, G., Haas, M., & Wagentristsl, H. (2014). Energy efficiency of agricultural machinery. *Biosystems Engineering*, 118, 1–11.
- Oakland, J. S. (2014). *Total quality management and operational excellence* (4th ed.). Routledge.
- Öz, E., & Özgünaltay Ertuğrul, G. (2016). İleri Yaşlı Çiftçilerin Tarımsal İş Güvenliğine Yaklaşımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 12(4), 221-227.
- Özgünaltay Ertuğrul, G. (2025). İç Anadolu Bölgesi'nde traktörlerin yıllık kullanım sürelerinin analizi: Kırşehir ve Yozgat örneği. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 9(3), 703–711.
- Özgünaltay-Ertuğrul, G., Aygün, İ., & Urkan, E. (2025). A study examining the potential of the 5S methodology for improving efficiency in agricultural production processes. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 13(3), 587–593.
- Özgünaltay Ertuğrul, G., Ertuğrul, Ö., & Öz, E. (2022). Tarım traktörleri kazaları ve tarımsal mekanizasyon düzeyi ilişkisi: Türkiye örneği. In *Tarımsal Perspektif* (pp. 289–305). Iksad Publications.

- Özgünaltay-Ertugrul, G., Ertugrul, O., & Degirmencioglu, A. (2019). Determination of agricultural mechanization level of Kirsehir province using geographical information systems (GIS). *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 72(8), 1144.
- Özüağ, S., & Ertuğrul, Ö. (2024). Enhanced occupational safety in agricultural machinery factories: Artificial intelligence-driven helmet detection using transfer learning and majority voting. *Applied Sciences*, 14(23), 11278.
- Pavlova, O., Pavlov, K., & Omelchuk, B. (2022). Formation of the quality management system as a factor of the competitiveness of the products of the agricultural industry enterprises. *Innovation and Sustainability*, 25–34.
- Pimentel, D., & Pimentel, M. (2008). *Food, energy, and society* (3rd ed.). CRC Press.
- Polat, H. E., Koc, D. G., Ertuğrul, Ö., Koc, C., & Ekinci, K. (2025). Deep Learning based individual cattle face recognition using data augmentation and transfer learning. *Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi)*, 31(1), 137–150.
- Ramdass, K., & Nemavhola, F. (2018). COST implications of the ISO 9001 quality management system in South African manufacturing organisations. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(1), 164–182.
- Rorat, M., Thannhauser, A., & Jurek, T. (2015). Analysis of injuries and causes of death in fatal farm-related incidents in Lower Silesia, Poland. *Forensic Science International*, 248, 1–8.
- Rodriguez Sinobas, L. (2014). Special Issue on Trends and Challenges of Sustainable Irrigated Agriculture. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6).
- Sayıncı, B., Çömlek, R., Çomaklı, M., & Demir, B. (2020). Operational image processing approach for spray coverage measurements in pesticide application. *Alinteri J. of Agr. Sci.* (2020) 35(2): 121-129
10.47059/alinteri/V35I2/AJAS20083
- Smihunova, O., Bohdaniuk, I., & Polyakova, Y. S. (2024). Innovative approaches to controlling in agribusiness: The role of quality management systems in sustainable production practices. *Archives for Technical Sciences*, 36(2), 160–169.

- Svendsen, K., Aas, O., & Hilt, B. (2014). Nonfatal occupational injuries in Norwegian farmers. *Journal of Agromedicine*, 19(4), 450-459.
- Tarí, J., Molina-Azorín, J. F., & Heras, I. (2012). Benefits of the ISO 9001 and ISO 14001 standards: A literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(2), 297–321.
- Unver, O. (2015). Water and agriculture for sustainable development. Water Monograph 3.
- Wilcock, A., & Boys, K. A. (2017). Improving quality management: ISO 9001 benefits for agrifood firms. *British Food Journal*, 119(4), 795–809.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, 153, 69-80.



ISBN: 978-625-378-489-8