BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİNDE YENİ GELİŞMELER

Editör
Hikmet YETER ÇOĞUN

BİDGE

BİDGE Yayınları

Biyosistem Mühendisliğinde Yeni Gelişmeler

Editör: Prof. Dr. Hikmet Yeter ÇOĞUN

ISBN: 978-625-372-401-6

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 25.12.2024
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İçindekiler

Tahıl, Baklagil ve Yağlı Tohum Depolanmasında Yatay ve Düşey Silo Kullanımı 4

Can Burak ŞİŞMAN 4

İsrafil KOCAMAN 4

Erhan GEZER 4

Gıda Güvenliği İçin Alternatif Su Kaynakları: Yağmursuyu Hasadı Ve Gri Su Kullanımı 15

Ezgi KURTULMUŞ 15

Tülay ELAL MUŞ 15

Tarımda Dronlar ve Geleceği 37

İ.H. CELEN 37

E. DURSUN 37

B. ÖZYURT 37

Tarım Robotlarında Navigasyon Teknikleri 67

Osman ECEOĞLU 67

İlker ÜNAL 67

Use Of Bıocar In Agrıcultural Productıon 94

Erhan GEZER 94

Can Burak ŞİŞMAN 94

Hassas Tarımda Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları 114

Osman ECEOĞLU 114

İlker ÜNAL 114

BÖLÜM I

Tahıl, Baklagil ve Yağlı Tohum Depolanmasında Yatay ve Düşey Silo Kullanımı

Can Burak ŞİŞMAN[1]
İsrafil KOCAMAN[2]
Erhan GEZER[3]

1.Giriş

Tarımsal ürünlerin çok az bir kısmı hasat edildikten hemen sonra tüketilmekte, büyük bir kısmı ise işlenerek tüketilmektedir. Ürünün gerek işlenmeden gerek işlendikten sonra, tüketilinceye kadar depolanması ise bir zorunluluktur. Depolamanın amacı, ürünün özelliklerini ve tazeliğini tüketilinceye veya işleninceye kadar korumaktır. Depolama, ürünün canlılık gücü kaybının en alt

[1] Prof.Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ/Türkiye (Orcid)
[2] Prof.Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ/Türkiye (Orcid)
[3] Dr. Öğr. Üyesi. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ/Türkiye (Orcid)

düzeyde tutulması amaçlanmaktadır. (Hall, 1980, Jones & Shelton, 1994, Shelton & ark., 1998). Ancak ürün çeşidine göre uygun koşular sağlanmadan yapılan depolamalar sonucunda büyük miktarda kantitatif ve kalitatif kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıpların azaltılması ancak uygun depolama koşullarının sağlanması ve depo yönetimi ile mümkündür (Şişman, 2003). Tahıl, baklagil ve yağlı tohumlar için uygun depolama koşulları ve depolama yönetiminde dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda özetlenmiştir.

2.Depolama Koşulları

Depolamanın amacına uygun ve ürünün hasat kalitesini koruyabilecek şekilde yapılabilmesi ancak ürün tipine ve özelliklerine uygun depolama şartlarının sağlanabilmesi ile mümkündür. Bu nedenle, depolanacak ürünün ve depolama yerinin aşağıdaki özellikleri iyi bilinmelidir.

2.1.Sıcaklık ve Nem

Depolama için en uygun sıcaklıklar kış ayları için dış hava sıcaklıklarına da bağlı olmak koşuluyla 0-5°C arasında, bahar ve yaz aylarında ise 17°C' ın altındaki sıcaklıklardır. Özellikle 17°C' ın altındaki sıcaklıklarda üründe önemli zararlara yol açan böcek, zararlı, mikroorganizma, küf ve mantarların üreme ve yaşamsal faaliyetleri de azalmaktadır (Hallevang, 1990, Ozocak & Sisman, 2018).

Yığın şeklinde depolanan ürünlerde güvenle depolama için yığın sıcaklıklarının yukarıda belirtilen değerler arasında tutulmasının yanında, yığın içerisinde bu sıcaklıkların homojenliğinin sağlanması da önemlidir. Eğer yığın içerisinde sıcaklık farkları oluşursa, sıcaklık farkının büyüklüğüne bağlı olarak

yığın içerisinde hava hareketi başlar ve bu harekete bağlı olarak yığın içerisinde Nem göçü adı verilen nem hareketi başlar (Hellevang, 1990). Nem göçü yığının farklı bölgelerinde nem birikimine ve ürün nem içeriğinin yükselmesi sonucunda kayıplara neden olmaktadır. Bu sebeple yığın içerisinde sıcaklık farkları önlenmelidir. Harner & ark (1998) dış hava sıcaklığı ile depo içerisindeki sıcaklık farkının 5°C' ın altında tutulması ile depo içerisinde oluşan nem göçünün engelleneceğini belirtmiştir. Dış hava ile depo sıcaklığı arasındaki ve depo içerisindeki bölgesel sıcaklık farkları ancak havalandırma yapılarak ortadan kaldırılabilir (Sisman & Ergin, 2011)

Güvenli depolama ve ürün kalitesinin korunabilmesinde etkili diğer faktör ise ürünün nem içeriğidir ve ürünün solunum miktarına ile depo havasının bağıl nemine bağlı olarak değişmektedir. Depolama süresine bağlı olarak güvenli depolama için ürün nem içeriği değerleri Tablo 1 de verilmiştir (Şişman, 2003).

Güvenli depolama için önerilen ürün nem içeriklerinin depolama süresince korunabilmesi, ürünün depo havasından nem çekmesinin engellenmesine bağlıdır. Tarımsal ürünlerin depo havasıyla nem alışverişinin durdurulduğu anki nem içeriği denge nem içeriği olarak isimlendirilmektedir. Denge nem içeriği ortamın nisbi nemine, sıcaklığa, ürün çeşidine ve olgunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Tarımsal ürünlerin farklı sıcaklık ve nisbi nem koşullarında ulaşacakları denge nem içeriklerinin bilinmesi, uygun depolama koşullarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Çizelge 2' de çeşitli ürünlerin farklı nisbi nem koşullarındaki denge nem içerikleri verilmiştir (Brooker & ark., 1992, Hellevang, 1994, Navarro, 1996).

Tablo 1. Tarımsal ürünlerin güvenli depolama için sahip olmaları gereken nem içerikleri

Ürün	% Nem İçeriği	
	6 Aydan Kısa Süreli Depolama İçin	6 Aydan Uzun Süreli Depolama İçin
Arpa	14	12
Mısır	15,5	13
Fasülye	16	13
Darı	10	9
Pirinç	13	12
Sorgum	13,5	13
Soya Fasülyesi	13	11
Çekirdeklik Ayçiçeği	11	10
Yağlık Ayçiçeği	10	8
Keten Tohumu	9	7
Buğday	14	13
Yulaf	14	13
Bazelye, Börülce	15	13

Çizelge 2. Ürünlerin farklı nisbi nem altındaki denge nem içerikleri.

Nisbi Nem %		%90	%80	%70	%60	%50
Denge Nem İçerikleri (%)	Buğday (25°C)	17,1	16,7	14,7	13,1	11,9
	Arpa (25°C)	19,2	15,7	13,4	11,9	10,6
	Mısır (25°C)	19,1	15,9	13,7	12,2	11,0
	Soya Fasülyesi (25°C)	21,3	15,8	12,1	9,7	7,8
	Sorgum (32°C)	-	14,7	13,5	12,4	11,3
	Fasülye (25°C)	-	18,2	14,9	12,6	11,0
	Yulaf (25°C)	18,2	15,0	12,8	11,4	10,3
	Pirinç (25°C)	18,3	15,3	13,4	12,0	11,0
	Çekirdeklik Ayçiçeği (21°C)	15,0	12,7	11,0	9,6	8,4
	Yağlık Ayçiçeği (21°C)	10,7	9,3	8,3	7,4	6,6
	Pamuk	19,6	12,9	10,1	9,1	7,8
	Keten Tohumu (25°C)	14,9	11,2	9,2	7,7	6,7

Çizelge 2'den görüleceği gibi, ürün tipine göre değişmekle beraber, genel olarak ürün nem içeriğinin sabit tutulabileceği depo

havası bağıl nemi % 60-65'i geçmemesi önerilmektedir (Brooker & ark., 1992).

Uygun depolama koşullarının oluşturulması, diğer bir ifadeyle ürün için uygun sıcaklık ve nemin sağlanması ve korunması doğru zamanda, yeterli ve homojen bir havalandırma ile mümkündür. Havalandırma yapılırken amaç yığın sıcaklığını önerilen güvenli depolama sıcaklık seviyesine çekmek ve yığın içerisinde sıcaklık farklılıklarını önlemektir (Şişman, 2003).

3.Yabancı Madde ve Zedeli Tane

Depolanacak ürün depoya yerleştirilmeden önce mutlaka temizlenmeli ve yabancı madde miktarı %3' ün altına düşürülmelidir. Ürün içerisindeki sap, saman, yabancı maddeler ve toz nemi çabuk absorbe ederek, güvenli depolama için gerekli koşulları olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca ürünün içerisindeki kırık ve zedeli taneler hızlı nemlenerek mikroorganizma, böcek ve zararlıların üründe oluşturdukları kayıp ve zararlar artmaktadır. Bu sebeple ürün içerisindeki kırık ve zedeli taneler de yabancı maddeler gibi temizlenmelidir (Proctor, 1994).

4.Depolama Yapıları ve Depo Tipleri

Tahıl, baklagil ve yağlı tohumların depolanmasında farklı tip ve malzemeyle inşa edilmiş depolar kullanılabilmektedir. Genel olarak düşey ve yatay depolar şeklinde inşa edilen bu yapılar, kullanılan malzemeye göre de çelik, krom, beton veya betonarme, ahşap ve geçici depolar olarak da sınıflandırılmaktadır (Şişman & Keskin, 2021).

Ülkemizde en yaygın kullanılan depolar yatay betonarme depolar ile çelik veya betonarme düşey silolardır. Bu depolar arasında malzeme, inşaat alanı, maliyet, inşa teknikleri, ürün takibi

ve sistem tasarımı gibi farklılıklar söz konusu olmasına karşın, depolanan ürün için depo içerisinde güvenli depolama koşulları oluşturulduğu müddetçe tarımsal ürünlerin depolanması açısında bir fark yoktur.

Hangi tip depo kullanılırsa kullanılsın, depo içerisindeki ürün sürekli kontrol edilmeli, yığında ısınma, nemlenme veya böceklenme gibi olumsuz koşullar görüldüğünde gerekli önlemler (havalandırma, ilaçlama) kolaylıkla alınabilmelidir.

4.1.Yatay Depolar

Tarımsal ürünlerin depolanmasında en önemli ve denetim altında tutulması gereken husus, ürüne göre uygun depolama koşullarının yani depo içerisinde uygun sıcaklık ve nemin oluşturulmasıdır. Hangi tip ve malzemeden inşa edilmiş depo kullanılırsa kullanılsın depo içerisinde uygun koşulların oluşturulması durumunda tarımsal ürünler güvenle depolanabilmektedir. Ancak depolama yapısının şekli, kullanılan malzeme, depolama biçimi gibi özellikler ürün için uygun depolama koşullarının oluşturulmasında ve denetiminde farklı dizayn ve sistem tasarımlarını zorunlu hale getirmektedir.

Yatay betonarme depolar ülkemizde tahıl, baklagil ve yağlı tohumların depolanmasında yaygın kullanılan depolama yapılarından bir tanesidir. Bu depoların yaygın olarak kullanılmasında sağladığı avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Düşük inşaat maliyeti

2. İnşa kolaylığı

3. Depolanan ürünün özelliklerinin izlenme ve denetiminin kolaylığı

4. Ürün özelliklerinde oluşabilecek olumsuzluklara karşı ürünü koruyucu önlemlerin (havalandırma, ilaçlama vb.) kolaylıkla uygulanması

5. Depo duvar yalıtımının daha iyi olması nedeniyle ürün ve depolama koşulları üzerindeki dış havanın mevsimsel değişiminin olumsuz etkisinin azaltılması

6. Yığın şeklinde depolanan tarımsal ürünlerde (buğday, ayçiçeği vb.) yığın yüksekliğinin az olması ve böylece üründe ezilme, kırılma gibi mekanik zararların ve buna bağlı oluşabilecek kayıpların azalması

7. Yapı yüksekliğinin düşük olması nedeniyle depreme ve doğal afetlere dayanımın yüksek olması

8. Depo bakım ve onarım maliyetlerinin düşük olması

9. Depo ve ekipmanlarının temizlik ve ilaçlama işlerinin kolay yapılması

10. Amortismanın düşük olması

11. Kullanım ömrünün uzun olması

12. Deponun istenilen şekil ve boyutta bölünebilmesi

13. Depo yapısının farklı amaçlarla kullanılabilir olması

14. Depo yapısının taşınmaz olarak kabul edilmesi sayılabilir.

4.2.Düşey Depolar

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de tahıl, baklagil ve yağlı tohumların depolamasında en yaygın kullanılan depolama şekli düşey depolardır. Düşey depo kullanımının tarımsal ürünlerin depolanmasında sağladığı avantajlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Depo inşaatı için arazi ihtiyacının küçük olması ve az alanda fazla ürün depolanabilmesi,

2. Mekanizasyona uygun olması

3. Deponun doldurma ve boşaltılmasının kolay ve hızlı yapılabilmesi

4. İşletme de işçilik giderlerinin az olması

5. Depo ve ekipmanlarının temizlik ve ilaçlama işlerinin kolay yapılması

6. Kullanım ömrünün uzun olması

7. Depo duvar yalıtımının daha iyi olması nedeniyle ürün ve depolama koşulları üzerindeki dış havanın mevsimsel değişiminin olumsuz etkisinin azaltılması

8. Depolama koşullarının izlenmesi ve denetiminin kolay yapılabilmesi

9. Ürün özelliklerinde oluşabilecek olumsuzluklara karşı ürünü koruyucu önlemlerin (havalandırma, ilaçlama vb.) kolaylıkla uygulanması sayılabilir

Düşey depolar daire kesitli ve konik çatılı olarak yapılmaktadırlar. Daire kesitli yapılmasının nedeni az malzeme kullanımına karşın yüklere karşı dayanımının daha yüksek olmasıdır. Fakat kesit alanının küçük olması, depodan zemine iletilen yükün zeminde oluşturduğu gerilmenin artmasına, dolayısıyla zeminde birim alana uygulanan yükün fazla olmasına sebep olur. Zeminin birim alanına uygulanan yapı yükünün fazla olması, yapı stabilitesini koruyabilmek adına temel boyutlarının

arttırılmasını zorunlu hale getirmekte, bu ise zemin için ek bir maliyet oluşturmaktadır.

Düşey depolarda karşılaşılan bir diğer sorun ise bu yapıların gelecekte meydana gelebilecek değişiklikler nedeniyle başka amaçlarla kullanılamamasıdır. Ayrıca yasal olarak düşey depoların taşınmaz olarak kabul edilmemesi de önemli bir sondur.

Kaynaklar

Hall, C.W. (1980). Drying and Storage of Agricultural Crops. The AVI Publishing Company Inc. ISBN 0-87055-364-X, 380 p. USA

Jones, D. & Shelton, P. (1994). Management to Maintain Stored Grain Quality. Nebraska State Unv. Cooperative Extension Service, Institute of Agriculture and Natural Researces, G 94-1199-A, 8 p. USA

Shelton, D., Jarvi, K.J., Jones, D. (1998). Initial Condition Determines Quality of Stored Grain. NebGuide, University of Nebraska Cooperative Extension Service.3 p. Nebraska

Şişman, C.B. (2003). Tahıl ve Baklagillerin Depolanması. Türk-Koop Ekin, 7(25): 73-77. Temmuz-Eylül 2003, Ankara

Hellevang, K.J. (1990). Crop Storage Management. NDSU. Extension Service, ND 58105-AE-791, 7 p. North Dakota, USA

Ozocak, M. & Sisman C.B. (2018). Effects of Licensed Storage on Wheat Quality in the Thrace Region. Journal of Scientific and Engineering Research, 2018, 5(9):194-198

Harner, J.P., Herrman, T.J., Reed, C. (1998). Temporary Grain Storage Considerations. Kansas State Unv. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, MF 2362, 4 p. Kansas

Sisman, C.B. & Ergin, S. (2011). The Effects of Different Storage Buildings on Wheat Quality. Journal of Applied Sciences 11(14): 2613-2619

Brooker, D.B., Arkema, F.B., Hall, C.W. (1992). Drying and Storage of Grains and Oilseeds. An AVİ Book, Published by Van Nostrand Reinhold, ISBN 0-442-20515-5, 443 p. New York

Hellevang, K.J. (1994). Grain Drying. NDSU Extension Service, AE-701, 4 p. USA

Navarro, S. (1996). Aeration and Cooling for Control of Stored Grain Insect. International Course on Agricultural Engineering Technology of Grain Storage, The Volkani Center, 14 p. Israel

Proctor, D.L. (1994). Grain Storage Techniques Evolution and Trends in Developing Countries. FAO Agricultural Service Bulletin No 109, ISBN 92-5-103456-7, 4 p. Roma

Sisman, C.B. & Köktaş Keskin A. (2021). Usage of the Modern Open Temporary Store for Wheat Storage. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 9(9): 1731-1734

BÖLÜM II

Gıda Güvenliği İçin Alternatif Su Kaynakları: Yağmursuyu Hasadı Ve Gri Su Kullanımı

Ezgi KURTULMUŞ[1]
Tülay ELAL MUŞ[2]

Giriş

Tarımsal faaliyetler büyük ölçüde iklime dayanmaktadır. İklim değişikliğinin etkileri gıda temini, güvenlik ve ekonomi için ciddi bir tehdittir. Bu nedenle, iklim değişikliği altında tarımsal uygunluğun ve verim azalmasının değerlendirilmesi sürdürülebilir tarımsal üretim için hayati öneme sahiptir. (Abd Elmabod & ark., 2020).

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksekokulu, Hayvansal ve Bitkisel Üretim Bölümü, Bursa/Türkiye, Orcid: 0000-0003-2535-2566, ezgikaberli@uludag.edu.tr
[2] Doç. Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Bursa/Türkiye, Orcid: 0000-0002-3943-0097, tulayelalmus@uludag.edu.tr

Gelecek yıllarda küresel gıda talebinde artış beklenmektedir ve bu durum önümüzdeki 50 yıl içinde tarımın ve gıda üretiminin sürdürülebilirliği için büyük zorluklar ortaya çıkarmaktadır (Tilman & ark., 2002). Bu talep toprak işlevleri ve ekosistem hizmetlerinin sağlanması ve düzenlenmesi üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini azaltmak için sürdürülebilir uygulamalar bulmak önemlidir (DeFries & ark., 2016; Untenecker & ark., 2017; Pereira & ark., 2018; Aggarwal & ark., 2019).

İklim değişikliği, gıda güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, aşırı yağışlar veya kuraklıklar nedeniyle çiftçilerimiz ürün kaybedebilmektedirler. Bu da gıdaya erişimimizi zorlaştırmaktadır. Ayrıca, sıcaklıkların artmasıyla bazı bölgelerde tarım yapmak imkansız hale gelebilir. Bu durum, gıda üretimini azaltarak fiyatları yükseltir ve herkesin yeterli beslenememesine neden olabilir. Uzun vadede ise bu sorunlar, gıda sistemimizin tamamını çökertebilir (FAO, 2009). İklim değişikliğinin gıda güvensizliğinden etkilenen insan sayısını artırması, 2080 yılına kadar 5 ila 170 milyon insanın açlık riski altında olması bekleniyor (Rosegrant & ark., 2008; Schmidhuber & Tubiello, 2007).

İklim değişikliği nedir?

İklim, her zaman diliminde ve birçok farklı nedenden dolayı değişir; bu nedenlerin hepsi tam olarak anlaşılamamış veya nicel olarak ifade edilememiştir. Bu nedenle politikaların, belirli iklim değişikliklerinin nedenlerinden bağımsız olarak belirsiz bir iklim geleceğine karşı dayanıklı olması gerekir. İklim

değişikliğinin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç duyulmasına rağmen, zaten çok iyi bildiğimiz çok şey var. Bizim görüşümüze ve iklim değişikliğine aşina çoğu bilim insanının görüşüne göre, en güvenilir bilgi kaynağı Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC, 2014) değerlendirme raporlarıdır (Romm, 2022). Bu bakış açısının bir sonucu olarak, IPCC iklim değişikliğini genel olarak "doğal değişkenlikten veya insan faaliyetinin bir sonucu olarak zaman içinde iklimde meydana gelen herhangi bir değişiklik" olarak tanımlar. Buna karşılık, FCCC (İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi), iklim değişikliğini "doğrudan veya dolaylı olarak insan faaliyetine atfedilen, küresel atmosferin bileşimini değiştiren ve karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde doğal iklim değişkenliğine ek olan bir iklim değişikliği" olarak tanımlar.Bu farklı tanımlar, adaptasyon gibi politika yanıtları hakkındaki kararlar için pratik çıkarımlara sahiptir. IPCC'nin yalnızca iklim değişikliğinin nedenleri ve sonuçlarına dair belirsizliği azaltma ve nicel hale getirme çabalarını değil, aynı zamanda belirli bir belirsizlik derecesinden bağımsız olarak dayanıklı politika alternatifleri geliştirme konusundaki çabalarını artırması gerektiği söylenebilir. İklim değişikliğinin farklı tanımları arasındaki temel farklılıkların nedenleri ne olursa olsun, FCCC yalnızca adaptasyona karşı bir önyargı yaratmakla kalmaz, aynı zamanda kesinlik derecesi üzerine tartışmaları da ateşleyerek iklim biliminin siyasallaşmasına yol açar (Pielke 2004).

İklim değişikliği, insan kültürleri, ekonomi ve ekosistemler için endişe verici sonuçları olan küresel bir endişe konusudur. Dünyanın iklimi bir milyon yıldır değişmektedir,

ancak mevcut değişim oranı, yalnızca doğal süreçlerle açıklanabilecek olandan önemli ölçüde daha hızlıdır. Tarım, iklim değişikliğinden önemli ölçüde etkilenir ve tarım hem sürdürülebilir kalkınma hem de gıda üretimi için hayati önem taşır. Çeşitli iklim değişikliklerinin tarım üzerindeki etkileri arasında sıcaklık, yağış ve aşırı hava koşullarındaki değişiklikler yer alır. Bu zararlı etkiler, tarımın hem ekonomik büyümeyi hem de gıda güvenliğini sağlamada önemli bir rol oynadığı gelişmekte olan ülkeler açısından endişe vericidir (Saleem & ark. 2024).

İklim değişikliği riskleri eşitsiz bir şekilde dağılmış durumda ve genellikle tüm gelişmişlik seviyelerindeki ülkelerdeki dezavantajlı insanlar ve topluluklar için daha fazla. Isınmanın büyüklüğü arttıkça ani veya geri döndürülemez değişiklik riskleri de artıyor. Bugün uygulananların ötesinde ek azaltma çabaları olmadan ve hatta adaptasyonla bile, 21. yüzyılın sonuna kadar ısınma, küresel olarak şiddetli, yaygın ve geri döndürülemez etkiler için yüksek ila çok yüksek riske yol açacaktır (Romm, 2022).

İklim değişikliği, gıda güvenliği ve tarım üretim sistemi için sürekli bir tehdit oluşturmaktadır. Tarım sektörü, devam eden iklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı etkileri nedeniyle sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada ciddi zorluklarla karşılaşmaktadır.

İklim değişikliğinin tarımsal sulama kaynakları üzerine etkileri

İklim değişikliği, tarımdan biyoçeşitliliğe kadar hayatın her alanını etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, taşkınlar, kuraklıklar

yani aşırı hava olayları gibi etkiler dünyamızın geleceği için büyük risk oluşturmaktadır. Özellikle su kaynaklarının üzerine etkisi tarım sektörünün üzerinde gıda güvenliği açısından büyük baskı oluşturmaktadır.

Tarım, ekonomik canlılığını korumak ve büyüyen bir nüfusun artan kalori taleplerini karşılamak için iklim değişikliğine uyum sağlaması gereken iklime duyarlı bir sektördür (Mu & ark, 2007). Bir başka ifadeyle, Su kaynakları ve tarım, kaynakların zamansal ve mekansal mevcudiyetini ve üretkenliğini doğrudan belirlediği için iklime en bağımlı sektörlerdir (Bantin & ark, 2017).

İklim değişikliğinin en tehdit edici sonuçlarından biri olan su kaynaklarının azalması sürdürülebilir tarımı etkileyecek boyutlara ulaşmaktadır (Karaman & ark. 2010). İklim değişikliğinin neden olduğu önemli sıcaklık değişimleri doğrudan ürün verimliliğini etkiler. Artan sıcaklıklar, tarımsal üretimi düşüren yüksek ısı ve suyla ilgili basınç seviyelerine yol açar. Atmosferin artan sıcaklığı, sera gazlarındaki artıştan etkilenir. Atmosferdeki ısı dalgaları, esas olarak karbondioksit (CO2), ozon (O3) ve su buharı (H2O) olmak üzere kızılötesi aktif gazlar tarafından emilir ve bunlar daha sonra sera etkisi olarak bilinen bir olguda dünyayı ısıtır (Malhi & ark.2021).

İklim değişikliğinin su kaynakları ve tarım üzerindeki doğrudan fiziksel etkileri, sosyal, ekonomik ve çevresel sistemler üzerinde dolaylı etkilere sahiptir ve dolayısıyla arazi ve su kaynaklarının yönetimini ve dağıtımını değiştirir (Sabbaghi & ark. 2020). Dünya çapında çok sayıda çalışma, iklim

değişikliği ile su kaynakları ve tarım arasındaki karmaşık ilişkileri incelemiştir. Çeşitli çalışmalar, nüfus projeksiyonları ve su kaynakları modelleriyle küresel iklim modellerinden (GCM'ler) simüle edilen iklim değişiklikleri kullanarak iklim değişikliğinin gelecekte küresel su kıtlığını nasıl etkileyebileceğini araştırmıştır (Simon & Arnell, 2016). İklim değişikliğinin su kaynakları sistemleri üzerindeki etkilerini anlamak, son birkaç on yılda kapsamlı bir şekilde denenmiştir (Fant vd., 2015; Brown & Wilby, 2012; Haasnoot & Middelkoop, 2012).

Ortalama küresel sıcaklık 1850'den bu yana 1,1–2 °C artmıştır. Bununla birlikte, kara kütlelerindeki daha belirgin sıcaklık değişiklikleri nedeniyle ortalama dünya kara sıcaklığı okyanusların yaklaşık iki katı kadar artmıştır. 1951 ile 1980 arasındaki ortalama sıcaklığın aksine, karaların küresel sıcaklıkları 1,32±0,04 °C artarken, okyanus yüzey sıcaklıkları (deniz buzu alanları hariç) 0,59±0,06 °C artmıştır. Ayrıca, Güney Yarımküre'den daha fazla kara kütlesi içerdiği için, Kuzey Yarımküre daha yüksek bir ortalama sıcaklık göstermiştir. Kutup bölgelerinde benzeri görülmemiş bir sıcaklık artışı buzulların erimesi gibi olumsuz sonuçlara yol açar (Kumar & ark. 2022).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC, 2021) geleceğe yönelik tahminleri, ortalama dünya sıcaklığının 2100'e kadar 2°C ve 2400'e kadar 4,2°C artacağını tahmin etmektedir. Yağış modellerindeki değişiklikler, hem kuraklıklara hem de gıdalara katkıda bulunan iklim değişikliğinin bir başka etkisidir. Birleşmiş Milletler'in Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2023), Altıncı Değerlendirme Sentez

Raporunda insan faaliyetlerinin ve hızlı endüstriyel gelişimin sera gazlarının yıllık konsantrasyonunu artırdığını ve bunun da ortalama küresel yüzey sıcaklığının sadece on yılda (2011-2020) yaklaşık 1,09 °C artmasına neden olduğunu açıkça belirtmiştir.

Çiftçiler kuraklıklara ekim modellerini ve sulama planlarını değiştirerek tepki verirler (Williams & Carrico, 2017). Bununla birlikte, iklim değişikliği su kaynakları yönetimine yönelik gelecekteki zorlukların yalnızca bir yönüdür; Değişen sosyoekonomik koşullar, hem ulusal hem de bölgesel ölçeklerde su kaynaklarının durumunu belirlemede daha önemlidir (Menzel & ark, 2019). Sosyoekonomik senaryolar ayrıca iklim değişikliğine karşı kırılganlık derecesini belirleyen temel faktörlerdir (Rodriguez & ark, 2015).

Tarımsal mevcut su kaynakları

Dünyadaki tahmini $1{,}4\times10^{18}$ metreküp (m^3) suyun %97'sinden fazlası okyanuslardadır (Shiklomanov & Rodda 2003). Dünyadaki suyun yaklaşık 35×10^{15} $m^{3'}$ü tatlı sudur ve bunun yaklaşık %0,3'ü nehirlerde, göllerde ve rezervuarlarda tutulur (Shiklomanov & Rodda 2003). Tatlı suyun geri kalanı buzullarda, kalıcı karda ve yeraltı suyu akiferlerinde depolanır. Dünya atmosferi yaklaşık 13×10^{12} m^3 su içerir ve Dünya'ya düşen tüm yağmurun kaynağıdır (Shiklomanov & Rodda 2003). Yıllık yaklaşık 151.000 kuad (159.300 ekzajoule) güneş enerjisi, Dünya yüzeyinden atmosfere yaklaşık 577×10^{12} m^3 su taşıyan buharlaşmaya neden olur. Bu buharlaşmanın %86'sı okyanuslardan gelir (Shiklomanov, 1991). Su buharlaşmasının sadece %14'ü karadan gelmesine rağmen, dünyadaki yağışın yaklaşık %20'si (yılda 115×10^{12} m^3) karaya düşer ve fazla su

nehirler aracılığıyla okyanuslara geri döner (Shiklomanov, 1991). Bu nedenle, her yıl güneş enerjisi önemli miktarda suyu okyanuslardan kara alanlarına aktarır. Hidrolojik döngünün bu yönü yalnızca tarım için değil aynı zamanda insan yaşamı ve doğal ekosistemler için de hayati öneme sahiptir (Pimentel & ark., 2004).

Su, tarımsal üretimin temel itici gücü ve en değerli girdisidir. 10.000 yıl önce bitki yetiştiriciliğinin başlangıcından bu yana, sulama suyu çiftçilerin yağış düzenlerine olan bağımlılıklarını azaltarak ürün verimlerini artırmalarını sağlamış, böylece yıllık değişkenliği azaltırken ortalama ürün üretimini artırmıştır (Fischer & ark., 2005). Günümüzde, sulanan alan dünya çapında, toplam ekili arazinin yaklaşık %18'ini oluşturmaktadır. Tarım, insan faaliyetleri arasında suyun en büyük kullanıcısıdır: sulama suyu, yenilenebilir su kaynaklarının toplam kullanımının %70'ini oluşturmaktadır (Fischer & ark., 2007). Farklı kaynaklardan gelen su, hem kullanım hem de tüketim için çeşitli insan faaliyetlerinde çekilir. Kullanım terimi , çekilen suyun bir kısmının yeniden kullanım için geri verildiği tüm insan faaliyetlerini ifade eder (örneğin, yemek pişirme suyu, yıkama suyu ve atık su). Buna karşılık, tüketim, çekilen suyun geri kazanılamaz olduğu anlamına gelir. Örneğin, bitkilerden gelen suyun buharlaşması atmosfere salınır ve geri kazanılamaz olarak kabul edilir (Pimentel & ark., 2004).

Ülkelerin su havzalarının doluluk oranı, doğrudan yağış miktarına bağlı olduğundan, iklim değişikliğinin bu havzalar ve yeraltı su kaynakları (akiferler) üzerindeki etkileri oldukça belirgindir. İklim senaryoları iklim değişikliğinin gelecekte yağış

miktarını azaltacağı yönündedir. Bu durum, zaten azalan su kaynaklarımız üzerinde ek bir baskı oluşturacak ve özellikle tarım gibi su ihtiyacı yüksek olan sektörleri olumsuz etkileyecektir (IFPRI, 2009). Yağış desenlerindeki değişiklikler, küresel ısınma ve bitkilerin büyüme dönemlerinin uzamasın artan sulama verimliliğine rağmen, 2080 yılına kadar net bitki su gereksinimlerinin küresel olarak %25 artacağı tahmin edilmektedir (Fischer & ark., 2007). Bütün bu olumsuzlukların sonucu olarak alternatif su kaynaklarını aramak tarım için umut verici olabilir.

Tarım, dünya çapındaki tatlı suyun yaklaşık %70'ini tüketiyor; örneğin, 1 kilogram (kg) tahıl üretmek için yaklaşık 1000 litre (L) suya ve 1 kg sığır eti üretmek için 43.000 L suya ihtiyaç duyuluyor. Yeni su kaynaklarının büyük kalkınma projelerinden ziyade koruma, geri dönüşüm ve iyileştirilmiş su kullanım verimliliğinden kaynaklanması muhtemeldir (Pimentel & ark., 2004).

Dünya üzerindeki mevcut su kaynakları, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği ve artan nüfusun gıda taleplerini karşılamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak, tatlı suyun sınırlı miktarda olması ve mevcut kaynakların büyük kısmının tarımsal sulama için tüketilmesi, suyun verimli ve bilinçli kullanımını zorunlu kılmaktadır. İklim değişikliği ve azalan yağış rejimleri gibi etkiler, bu kaynaklar üzerindeki baskıyı artırarak tarımsal sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Dolayısıyla, tarım sektörü, artan su talebine yanıt verebilmek için mevcut kaynakların yanı sıra yenilikçi ve alternatif sulama yöntemlerine yönelmelidir.

Alternatif su kaynakları

İklim değişikliğinin mahsul üretimi üzerindeki doğrudan etkilerine ek olarak, iklim değişikliğinin birleşik etkileri, artan nüfus talepleri ve gelecekteki sosyoekonomik kalkınma kapsamında diğer ekonomik sektörlerden gelen rekabet nedeniyle gelecekteki tarımsal su gereksinimleri ve su bulunabilirliği konusunda endişeler bulunmaktadır. Yenilenebilir su kaynakları, giderek artan sayıda insanın su kıtlığı koşullarında yaşadığı gibi, önümüzdeki on yıllarda insan toplumlarının sürdürülebilirliği için giderek daha fazla önemli olarak kabul edilmektedir (Tubiello & Fischer, 2007; Assessment, 2005).

Sulama tarımının sürdürülebilirliği, 2025 yılına kadar Dünya'daki her dört kişiden birinin aşırı su kıtlığı çekebileceği yönündeki gelecek projeksiyonları göz önüne alındığında, olumsuz iklim değişikliği nedeniyle tehdit altındadır. Basınçlı sulama sistemleri ve uygun sulama programları, su verimliliğini (yani, mahsulün tükettiği birim su hacmi başına ürün verimi) artırabilir ve geleneksel yüzey sulama yöntemlerinin aksine buharlaşma veya sistem su kaybını azaltabilir. Ancak, su kıtlığı olan ülkelerde, sulama yönetimi sıklıkla karmaşık bir görev haline gelir. Açık sulama ve geleneksel olmayan su kaynaklarının (örneğin, atık su, acı yeraltı suyu) kullanımı, birçok durumda su yoksulluğu sorununu ele almak için iklim değişikliği azaltma önlemlerinin bir parçası olarak benimsenmiştir (Nikolaou & ark., 2020).

Yağmur suyu hasadı

Tarım için su kaynaklarının kıt olduğu bir bağlamda, yağmur suyu hasadı son yıllarda farklı disiplinler tarafından incelenen umut verici bir alternatif oluşturmaktadır.

Su kaynaklarının ortak kullanımını ve geleneksel olmayan su kaynaklarının sağlanması için altyapıların geliştirilmesini önerilmektedir (Singh, 2014; Aznar-Sánchez & ark., 2019). Bunu göz önünde bulundurarak, en iyi alternatiflerden biri daha iyi yağmur suyu yönetim sistemleri kullanarak iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamaktır (Yosef & Asmamaw, 2015. Bu nedenle, sulama için yağmur suyu hasadı (RWHI), su kıtlığını gidermek için bir çözüm olarak önerilmektedir (Leong & ark., 2018).

Yağmur suyu hasadı, yağmur suyunun genellikle su toplama alanının boyutundan daha küçük olan bir çiftçilik alanında doğrudan hasat edilmesi, depolanması ve korunması anlamına gelir (Boers & Ben Asher, 1982). Yağmur suyu hasadı, genellikle yağışın ürün yetiştirmek için yetersiz olduğu alanlarda uygulanır. En yaygın kullanım, bitkilerin büyüme aşamalarında su kıtlığı veya stres dönemlerinde yağışı tamamlayan tamamlayıcı sulamadır. Yağmur suyu hasadının tamamlayıcı sulama olarak temel amacı, uzak alanlardan veya kullanılmadığı alanlardan gelen akışı toplamak, depolamak ve su kıtlığı olan her yerde ve zamanda kullanılabilir hale getirmektir. Bu nedenle, akış olaylarının aralıklı doğası nedeniyle, yağmurlu mevsimde mümkün olan en fazla miktarda yağmur suyunun depolanması ve böylece daha sonraki bir tarihte kullanılabilmesi gereklidir. Yağmur suyu hasadı sistemlerinin kullanımı bir dizi avantaja

sahiptir. Suyun toplanması, sulama için su talebinin bir kısmını karşılar ve depolama sayesinde kuraklık ve kurak mevsimler nedeniyle yaşanan kıtlık dönemlerini hafifletir (Oweis & Hachum, 2003).

Yağmurla beslenen tarım ürünlerinin yağmur suyu hasadı kullanılarak sulanması, su verimliliğini ve dolayısıyla mahsul verimini artırmak için olası bir seçenektir. Kurak ve yarı kurak alanlarda yağmurla beslenen tarım, bu bölgelerin toplam tahıl üretiminin %90'ına kadar katkıda bulunur. Ancak, birçok ülkede, optimumdan daha az yağış özellikleri, elverişsiz arazi koşulları ve bu kaynakların uygun şekilde yönetilmemesi nedeniyle verimlilik düşük kalmaya devam etmektedir. Yağmurla beslenen alanların verimliliğinin artırılması, gıda güvenliğini artırabilir, geçim kaynaklarını iyileştirebilir ve sulama sıklığını azaltabilir (Mwenge & ark., 2005).

Yağmur suyu hasadı, gelişmekte olan ülkelerde su kıtlığını en aza indirmek için yararlı bir yöntem gibi görünüyor. Havza alanlarını belirlemek ve hasat sistemleri oluşturmak için yerel malzemelerin ve insan gücünün kullanılması esastır. Tarımsal kullanım için hasat edilen suyun çoğu, buharlaşmadan koruyan doğal sistemlerde yeraltında depolanabilir. Öte yandan, evsel kullanım için hasat edilen yağmur suyu, bakteri ve tehlikeli maddelerle kirlenmiş olabilir ve bu da havza alanının dikkatli bir şekilde seçilmesini gerektirir. Dezenfeksiyon amaçları için birçok teknik mevcuttur, bunlardan bazıları güneş enerjisi gibi doğal kaynakları kullanır. GIS teknolojisi, RWH için potansiyel alanların bulunmasını geliştirebilir(Helmreich & Horn, 2009).

Gri su kullanımı

Çoğunlukla tarıma dayalı yerel ekonomi bu su kıtlığından ağır şekilde etkilenmektedir ve sulama uygulaması yayıldıkça alternatif su kaynaklarına olan ihtiyaç daha acil hale gelmiştir. Arıtılmış belediye atık suları, doğal kaynakların yetersizliğinin yol açtığı zararları azaltmak için en kolay ulaşılabilen alternatif su kaynaklarından biridir; ancak bu tercih geleneksel olarak kamuoyunun kabul etmediği sorunlardan etkilenmektedir (Pollice & ark., 2004).

Gri su, lavabo, duş, banyo ve çamaşır makineleri gibi evsel kaynaklardan gelen, düşük kirletici içeriği nedeniyle yeniden kullanıma uygun bir atık sudur. Siyah sudan (tuvalet atık suyu) farklı olarak gri su, yeniden kullanıma uygunluğu sayesinde önemli bir su kaynağı potansiyeline sahiptir. Tarımsal sulamada gri suyun kullanımı, tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltırken, içeriğindeki besin maddeleriyle bitki büyümesini destekleme potansiyeline sahiptir. Ancak, tuzluluk, deterjan kalıntıları ve olası patojen riskleri nedeniyle gri suyun kullanımı öncesinde uygun arıtma işlemleri gereklidir. Su kıtlığı olan bölgelerde, gri suyun sürdürülebilir tarımda önemli bir alternatif su kaynağı olarak değerlendirilmesi mümkündür (Pimentel & ark., 2004).

Gri su ile sulamanın etkileri, geleneksel yeraltı suyuyla kaydedilenlerle karşılaştırıldığında, hem toprak kimyasal özellikleri hem de toprak ve mahsullerin mikrobiyal içeriği açısından önemli farklılıklar göstermemiş ve bu nedenle, membran filtrasyonu, ikincil atık suları geri kazanmak ve sulama için alternatif bir su kaynağı sağlamak için uygulanabilir bir

teknoloji olarak düşünülebileceği ortaya konulmuştur (Pollice & ark., 2004).

Su kıtlığı birçok yarı kurak ve kurak bölgede kritik bir sorun haline gelmiştir. Bu tür bölgelerdeki en büyük su kullanımı, genellikle yeraltı suyu ve yüzey suyu kaynaklarına dayanan mahsul sulamasındadır. Bu geleneksel su kaynaklarına yönelik artan stresle birlikte, sınırlı tatlı su kaynaklarına sahip alanlar için alternatif sulama kaynaklarını dikkate almak önemlidir. Potansiyel sulama suyu kaynaklarından biri, kent merkezlerine yakın bulunan tarım alanları için arıtılmış atık sudur. Ayrıca, arıtılmış atık su bitkiler için önemli miktarda gerekli besin sağlayabilir. Geri kazanılmış suyun belirli uygulamalar için uygunluğu, su kalitesine ve kullanım gereksinimlerine bağlıdır. Geri dönüştürülmüş suyun tarımsal sulama için uygunluğunu belirleyen ana faktörler, insanlar, bitkiler ve topraklar üzerinde olumsuz etkilere neden olan tuzluluk, ağır metaller ve patojenlerdir (Tran & ark., 2016).

Dünya çapındaki hızlı kentleşme, yeterli çevre koruması için finansal araçların eksikliği, yerel tatlı su kıtlığı sorunu, artan kirletici akarsular ve kent merkezlerinde ve çevresinde hızla artan gıda gereksinimleri göz önüne alındığında, bu sorunu ele almak için ortaklaşa kabul edilmiş bir yaklaşıma varmak önemlidir. Arıtılmış atık suyun tarımsal kullanımının, farklı konuları, farklı disiplinlerin alanını, mantıksal ve aşamalı bir çerçevede birbirine bağlamaya izin veren bir su zinciri yaklaşımının parçası olarak incelenmesi ve tasarlanması önerilmektedir (Huibers & ark., 2005).

Sonuç

Bu çalışmada, gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarım için alternatif su kaynaklarının potansiyeli ve önemi ele alınmıştır. İklim değişikliği, azalan su kaynakları ve artan nüfus baskısı, mevcut su kaynaklarının korunması ve yenilikçi çözümlerin benimsenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yağmur suyu hasadı ve gri su kullanımı gibi yöntemler, tarımsal üretimde verimliliği artırırken, tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı hafifletmekte ve tarımsal sürdürülebilirlik için umut vadetmektedir. Ancak bu yöntemlerin etkili uygulanabilmesi için bölgesel koşullara uygun planlama, teknik altyapının geliştirilmesi ve toplumsal farkındalığın artırılması gereklidir. Sonuç olarak, alternatif sulama kaynakları, gelecekte tarım sektörünün karşılaşacağı su kıtlığı sorunlarına karşı yenilikçi ve etkili çözümler sunmaktadır. Bu çözümler, yalnızca tarımsal üretim kapasitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda ekosistemlerin korunmasına ve suyun daha verimli kullanılmasına katkıda bulunacaktır. Böylece, hem gıda güvenliğinin sağlanması hem de iklim değişikliği etkilerinin azaltılması mümkün olacaktır.

Kaynaklar

Abd-Elmabod, S. K., Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Anaya-Romero, M., Phillips, J. D., Jones, L., ... & de la Rosa, D. (2020). Climate change impacts on agricultural suitability and yield reduction in a Mediterranean region. Geoderma, 374, 114453.

Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., Campbell, B. M., & Kropff, M. (2019). Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture. Global Food Security, 23, 41-48.

Assessment, M. E. (2005). Ecosystems and human well-being: wetlands and water. World Resources Institute.

Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., Velasco-Muñoz, J. F., & Valera, D. L. (2019). Aquifer sustainability and the use of desalinated seawater for greenhouse irrigation in the Campo de Níjar, Southeast Spain. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(5), 898.

Bantin, A. B., Jun, X., & Si, H. (2017). The impact of climate change on water resource of agricultural landscape and its adaptation strategies: A case study of Chari Basin, Chad. J. Earth. Sci. Clim. Change, 8, 1-8.

Birleşmiş Milletler. (2012). The United Nations world water development report 4: managing water under uncertainty and risk (1st ed.). Paris: UNESCO.

Boers, T. M., & Ben-Asher, J. (1982). A review of rainwater harvesting. Agricultural Water Management, 5(2), 145-158.

Brown, C., & Wilby, R. L. (2012). An alternate approach to assessing climate risks. Eos, Transactions American Geophysical Union, 93(41), 401-402.

DeFries, R., Mondal, P., Singh, D., Agrawal, I., Fanzo, J., Remans, R., & Wood, S. (2016). Synergies and trade-offs for sustainable agriculture: Nutritional yields and climate-resilience for cereal crops in Central India. Global Food Security, 11, 44-53.

Esperón-Rodríguez, M., Bonifacio-Bautista, M., & Barradas, V. L. (2016). Socio-economic vulnerability to climate change in the central mountainous region of eastern Mexico. Ambio, 45, 146-160.

Fant, C., Gebretsadik, Y., McCluskey, A., & Strzepek, K. (2015). An uncertainty approach to assessment of climate change impacts on the Zambezi River Basin. Climatic Change, 130, 35-48.

Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., & Van Velhuizen, H. (2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360(1463), 2067-2083.

Fischer, G., Tubiello, F. N., Van Velthuizen, H., & Wiberg, D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water

requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. Technological Forecasting and Social Change, 74(7), 1083-1107.

Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. Climatic Change, 134, 371-385.

Haasnoot, M., & Middelkoop, H. (2012). A history of futures: a review of scenario use in water policy studies in the Netherlands. Environmental Science & Policy, 19, 108-120.

Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. Desalination, 248(1-3), 118-124.

Huibers, F. P., & Van Lier, J. B. (2005). Use of wastewater in agriculture: the water chain approach. Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage, 54(S1), S3-S9.

IFPRI (International Food Policy Research Institute). (2009). Impact on Agriculture and Costs of Adaptation, Food Policy Report.

IPCC. (2021). Summary for policymakers. In: Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. (2023). Synthesis report (SYR) of the IPCC sixth assessment report (AR6). Cambridge University Press, Cambridge.

Karaman, S., & Gökalp, Z. (2010). Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkileri. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, (1), 59-66.

Kumar, L., Chhogyel, N., Gopalakrishnan, T., Hasan, M. K., Jayas-inghe, S. L., Kariyawasam, C. S., Kogo, B. K., Ratnayake, S. (2022). Climate change and future of agri-food production. In Future foods: global trends, opportunities, and sustainability challenges (pp. 49–79). Elsevier, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91001-9.00009-8

Leong, J. Y. C., Chong, M. N., Poh, P. E., Vieritz, A., Talei, A., & Chow, M. F. (2018). Quantification of mains water savings from decentralised rainwater, greywater, and hybrid rainwater-greywater systems in tropical climatic conditions. Journal of Cleaner Production, 176, 946-958.

Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. Sustainability (Switzerland), 13(3), 1–21. https://doi.org/10.3390/su13031318

Menzel, L., Flörke, M., Matovelle, A., & Alcamo, J. (2007, November). Impact of socio-economic development and climate change on water resources and water stress. In Proceedings of the 1st International Conference on Adaptive and Integrative Water Management (CAIWA 2007), Basel, Switzerland (pp. 12-15).

Mwenge Kahinda, J., Boroto, R. J., & Taigbenu, A. E. (2005, September). Developing an integrated water resources

management and rainwater harvesting systems in South Africa. In 12th SANCIAHS Symposium (pp. 5-7).

Mu, J. E., Sleeter, B. M., Abatzoglou, J. T., & Antle, J. M. (2017). Climate impacts on agricultural land use in the USA: the role of socio-economic scenarios. Climatic Change, 144, 329-345.

Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. Agronomy, 10(8), 1120.

Oweis, T. Y., & Hachum, A. Y. (2003). Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. In Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement (pp. 179-198). Wallingford, UK: CABI Publishing.

Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. Current Opinion in Environmental Science & Health, 5, 7-13.

Pielke Jr, R. A. (2004). What is climate change?. Energy & Environment, 15(3), 515-520.

Pollice, A., Lopez, A., Laera, G., Rubino, P., & Lonigro, A. (2004). Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: a field investigation in Southern Italy. Science of the Total Environment, 324(1-3), 201-210.

Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., ... & Nandagopal, S. (2004). Water

resources: agricultural and environmental issues. BioScience, 54(10), 909-918.

Romm, J. (2022). Climate change: What everyone needs to know. Oxford University Press.

Rosegrant, M. W., Zhu, T., Msangi, S., & Sulser, T. (2008). Global scenarios for biofuels: impacts and implications. Review of Agricultural Economics, 30(3), 495-505.

Sabbaghi, M. A., Nazari, M., Araghinejad, S., & Soufizadeh, S. (2020). Economic impacts of climate change on water resources and agriculture in Zayandehroud river basin in Iran. Agricultural Water Management, 241, 106323.

Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(50), 19703-19708.

Shiklomanov, I. A. (1991). The world's water resources. In Proceedings of the international symposium to commemorate (Vol. 25, pp. 93-126). UNESCO.

Shiklomanov, I. A., & Rodda, J. C. (Eds.). (2003). World water resources at the beginning of the twenty-first century. Cambridge University Press.

Singh, A. (2014). Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. Journal of Hydrology, 519, 1688-1697

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, 418(6898), 671-677.

Tran, Q. K., Schwabe, K. A., & Jassby, D. (2016). Wastewater reuse for agriculture: Development of a regional water reuse decision-support model (RWRM) for cost-effective irrigation sources. Environmental Science & Technology, 50(17), 9390-9399.

Tubiello, F. N., & Fischer, G. (2007). Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000–2080. Technological Forecasting and Social Change, 74(7), 1030-1056.

Untenecker, J., Tiemeyer, B., Freibauer, A., Laggner, A., & Luterbacher, J. (2017). Tracking changes in the land use, management and drainage status of organic soils as indicators of the effectiveness of mitigation strategies for climate change. Ecological Indicators, 72, 459-472.

Williams, N. E., & Carrico, A. (2017). Examining adaptations to water stress among farming households in Sri Lanka's dry zone. Ambio, 46(5), 532-542.

Yosef, B. A., & Asmamaw, D. K. (2015). Rainwater harvesting: An option for dry land agriculture in arid and semi-arid Ethiopia. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 7(2), 17-28.

BÖLÜM III

Tarımda Dronlar ve Geleceği

İ.H. CELEN[1]
E. DURSUN[2]
B. ÖZYURT[3]

1. Giriş

Tarım, insanlık tarihinin en temel ekonomik faaliyetlerinden biri olmasına rağmen, günümüzde nüfus artışı, iklim değişikliği ve sınırlı doğal kaynaklar gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Her geçen gün tarım alanları küçülürken şehirler köylere komşu olma durumundadır. Nüfus artışıyla gıda ihtiyacının arttığını da düşünürsek birim alandan daha fazla ürün almak artık bir zorunluluktur. Bu sorunlara çözüm olarak, teknolojinin tarıma entegrasyonu büyük bir gereklilik haline

[1] Prof.Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Süleymanpaşa, Tekirdağ, Orchid: 0000-0003-1652-379X; e-mail: icelen@nku.edu.tr
[2] Prof.Dr., Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Süleymanpaşa, Tekirdağ, Orchid: 0000-0001-5109-6071; e-mail: ergin.dursun@agri.ankara.edu.tr
[3] Araş.Gör., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Süleymanpaşa, Tekirdağ, Orchid: 0 000-0003-0775-1723; e-mail: berkozyurt@nku.edu.tr

gelmiştir. Bu bağlamda, dron teknolojisi (İnsansız Hava Araçları-İHA) tarımda verimlilik, sürdürülebilirlik ve çevre dostu uygulamalar açısından çığır açıcı bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Türkiye gibi tarımsal üretim açısından önemli bir ülkede, dronların yaygınlaşmasıyla birlikte hem üretim süreçleri iyileşmekte hem de çevresel etkiler minimize edilmektedir. Ancak bu teknolojinin kullanımı, fırsatlarla birlikte bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle konusunda uzman olmayan bilinçsiz kullanım Zirai İnsansız Hava Araçlarına (ZİHA) olan ilgiyi endişeli hale getirmiştir.

Dronların tarımda kullanımı 1980'lerden bu yana hızlı bir evrim geçirmiştir. İlk olarak askeri ve sivil gözetim ile keşif görevlerinde kullanılan İHA'lar, 2000'li yıllarda dijital teknolojiler ve gelişmiş sensörlerle donatılmıştır. Bu sayede tarım sektörüne daha geniş bir şekilde entegre olmuşlardır. Günümüz dronları, mahsul sağlığı, kaynak yönetimi ve girdi optimizasyonu hakkında hassas veri toplama yetenekleri ile hassas tarımın vazgeçilmez araçları haline gelmiştir.

Tarım dronları, tasarımlarına ve operasyonel modlarına göre, geniş alanları kapsayacak şekilde tasarlanan, yüksek irtifalarda çalışarak geniş tarım alanlarında yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edebilen, genellikle büyük ölçekli haritalama ve gözetim görevleri için kullanılan Sabit Kanatlı Dronlar; Yüksek manevra kabiliyeti ve havada sabit kalabilme özelliklerine sahip, hedefe yönelik püskürtme ve detaylı mahsul incelemeleri gibi hassas uygulamalara uygun, dikey kalkış ve iniş yetenekleriyle zorlu arazilerde kullanım için ideal Multikopter Dronlar; Diğer sınıflarla aynı özellikleri taşımakla birlikte dikey kalkış ve iniş yapabilirken daha uzun uçuş sürelerine sahip Hibrit Dronlar; Taşınabilirliği kolay, performansı sabit kanatlı dronlara benzeyen, ancak küçük ve orta ölçekli tarımsal uygulamalar için ideal katlanabilir Kanatlı Dronlar olarak sınıflandırabiliriz.

Bu sınıflandırmada teknolojiler analiz edildiğinde, sabit kanatlı, multikopter ve helikopter dronlarının tarımsal ortamlarda kullanımına dair temel parametreler karşılaştırmalı olarak Çizelge

1'de verilmiştir. Çizelge 1'e göre farklı dron türlerinin tarımsal uygulamalardaki kabiliyetleri incelendiğinde, sabit kanatlı dronlar geniş alanların taranması ve dayanıklılık açısından üstün görülmektedir. Ancak multikopterler detaylı incelemeler ve hedefe yönelik uygulamalar için daha başarılı görülmektedir.

Tarımda kullanılan dronların yapısal bileşenleri incelendiğinde, hava platformunun, sistemin performansını ve işlevselliğini belirleyen temel unsurlardan biri olduğu görülmektedir. Bu platformlar, genellikle hafiflik ve dayanıklılık sağlamak amacıyla karbon fiber gibi gelişmiş malzemelerden üretilmektedir. Aerodinamik tasarımlar, enerji verimliliğini artırarak daha uzun uçuş sürelerine olanak tanımaktadır. Tarımsal dronların büyük bir kısmında, performans ve bakım kolaylığı açısından avantaj sunan elektrikli tahrik sistemleri tercih edilmektedir. Bununla birlikte, uzun süreli operasyonların gerektiği uygulamalarda hibrit güç sistemlerinin kullanımının giderek yaygınlaştığı gözlemlenmektedir. Dronların uçuş süreleri, tasarım özelliklerine ve kullanım amacına bağlı olarak yaklaşık 20 dakikadan birkaç saate kadar değişiklik gösterebilmektedir.

Çizelge 1. Dron türlerine ait bazı parametreler (Guebsi vd., 2024)

Parametre	**Sabit Kanatlı Dronlar**	**Multikopter Dronlar**	**Helikopterler**
Ağırlık (kg)	5–23	0.25–20	5–35
Uçuş Süresi (dakika)	30–120	15–45	15–45
Maksimum Hız (m/s)	15–50	3–20	10–30
Uçuş Alanı (ha)	10–40	1–8	4–12
Mekansal Çözünürlük (cm/piksel)	0.6–5	0.6–5	0.6–5

2. Dronların Hassas Tarımda Yeri

Hassas tarım uygulamaları için santimetre seviyesinde doğruluk sağlayan uydu navigasyon sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca IMU (eylemsizlik ölçüm birimleri); dronun uçuşunu stabilize etmek ve hassas navigasyonu sağlamak için GPS verileriyle birleştirilir. Bunun yanında tarım alanlarında ağaç, direk vb. engeller olabilmektedir. Bu amaçla LiDAR veya stereoskopik kameralar kullanılarak, otonom uçuş sırasında güvenliği sağlamak için engel

algılama sistemleri entegre edilmiştir.

Dron kontrolü ve gerçek zamanlı veri aktarımı için 2.4 GHz ve 5.8 GHz gibi frekanslar kullanılarak kısa ve uzun mesafeli veri bağlantıları vardır. Görüş hattı ötesi (BVLOS) operasyonlar için 4G/5G ağlarının entegrasyonu, menzili ve etkinliği artırır. Bir dron veya insansız hava aracının, operatörün doğrudan görüş alanı dışında kontrol edilmesi anlamına gelen bir terimdir. BVLOS operasyonlarında, dronun hareketlerini izlemek ve yönlendirmek için genellikle sensörler, GPS, kameralar ve diğer iletişim teknolojileri kullanılır. Bu yöntem, özellikle geniş alanların taranması veya ulaşılması zor bölgelerde görevlerin yerine getirilmesi için idealdir.

Dronlar yer kontrol istasyonları (GCS) olarak güçlü bilgisayarlar, yüksek çözünürlüklü ekranlar ve kullanıcı dostu kontrol arayüzleriyle donatılmıştır. Görev planlama yazılımları, uçuş rotalarının optimize edilmesini, hava durumu verilerinin entegrasyonunu ve düzenleyici kısıtlamaların yönetilmesini sağlar.

Hassas tarımda dronların tanı uygulamaları, önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Dronların bitki sağlığı değerlendirmesi, hastalık ve zararlıları erken tespit etme, su stresi analizi gibi uygulamaları, çiftçilerin bilinçli kararlar almasına, kaynak kullanımını optimize etmesine ve mahsul verimliliğini artırmasına olanak tanır.

Dronlarla bitki sağlığını değerlendirme, son yıllarda önemli ölçüde ilerlemiştir ve çiftçilere kesin olmayan tanı araçları sağlamaktadır.

Multispektral görüntüleme ile, çıplak gözle fark edilemeyen besin eksiklikleri veya zararlı istilaları gibi stres faktörleri erken tespit edilebilir. Derin öğrenme algoritmaları, dron görüntülerini analiz ederek bitki hastalıklarını ve mahsul sağlığını doğru bir şekilde tespit etmektedir. RGB kameralarla yapılan çalışmalar, örneğin buğday yoğunluğunun tahmininde yüksek bir doğruluk oranı (R^2=%91) göstermiştir.

Hastalık ve zararlıların erken tespiti, verim kayıplarını önlemek için kritik öneme sahiptir. Multispektral sensörlere sahip dronlar, zararlıların ve yabancı otların mahsul üzerindeki etkisini erken

aşamalarda %93 doğrulukla tespit edebilir. Yapay zekâ ve IoT sistemlerinin entegrasyonu, geleneksel yöntemlere kıyasla hastalık tespitinde önemli bir doğruluk artışı sağlamaktadır.

Su stresi, mahsul sağlığını olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Termal sensörler, bitki gövdesi sıcaklığını ölçerek su stresini erken aşamalarda tespit edebilir (Zhou vd., 2021). Multispektral görüntüler ve doku analizi birleştirilerek buğday gibi ürünlerde su stresi tespiti yapılmış ve geleneksel yöntemlere göre daha yüksek doğruluk elde edilmiştir.

Dron haritalama teknolojileri, tarımsal yönetim için eşi görülmemiş bir hassasiyet ve çözünürlük sağlamaktadır. Dronlar, 0.5 cm/piksel çözünürlükte haritalar üretebilir ve tarladaki değişkenlikleri ayrıntılı olarak analiz edebilir. RGB ve multispektral görüntüleme, özellikle bağcılık gibi alanlarda bitki sağlığını ve verimliliğini izlemek için kullanılmaktadır

Azot kullanımı etkinliği ve verim tahmini için multispektral kameralar kullanılırken, özellikle zeytin ağaçları gibi ürünlerde su stresinin tespitinde termal kameralar tercih edilmektedir. Multispektral ve termal sensörler, zayıf drenaj alanlarını tespit etmek ve sulama sistemlerini optimize etmek için de kullanılmaktadır.

Çizelge 2'de dronlardaki çeşitli sensörlerin tarımsal uygulamalarda kullanım alanları verilmiştir. Günlük toprak su dengesi modelleri ile multispektral görüntüleme, ürünlerin su kullanım verimliliğini değerlendirmede kullanılmıştır. Dron görüntüleri ve yer radarı (GPR) birleşimi, yeraltı drenaj sistemlerinin %90'ın üzerinde doğrulukla haritalanmasını sağlamıştır.

Çizelge 3 dronların tarımda tanı uygulamalarındaki çeşitli kullanımlarını ve bu uygulamalara dair önemli sonuçları özetlemektedir. Sensör teknolojileri ve yapay zekâ tabanlı analizlerle, dronlar tarımda verimlilik ve sürdürülebilirlik için kritik bir rol oynamaktadır. Gelişmiş görüntü işleme teknikleri ve yapay zekâ algoritmaları, yabancı otları %92-95 doğrulukla tespit edebilirken, transformer modelleri, geleneksel yöntemlere göre daha yüksek bir doğruluk sağlamaktadır (Zhao vd., 2023).

Çizelge 2. Sensörlerin kullanım alanları

Sensör Türü	**Açıklama**	**Tarımsal uyg**
RGB Kameralar	RGB kameralar, mahsul haritalama ve görsel denetim için kullanılır. 400–700 nm dalga boyundaki görünür ışığı algılarlar. Örneğin, bitki yoğunluğunu çok yüksek doğrulukla tahmini	Genel mahsul haritalama, bitki sağlığı tespit
Multi-spektral Sensörler	Belirli spektral bantları algılar. 4–6 farklı spektral bandı algılar (genellikle görünür [400–700 nm] ve yakın kızılötesi [700–1000 nm] aralığında).	Bitki stres ve klorofil içeriği ölçümü
Hiper-spektral Sensörler	Yüzlerce dar bantı algılar. 400–2500 nm arasında yüzlerce dar bandı algılayabilir ve bitki sağlığı ile erken stres tespiti için kritik öneme sahiptir. Bu sensörler, çıplak gözle görülemeyen bitki streslerini tespit edebilir	Hastalıkların erken tespiti, besin eksikliği analizi
Isıl Kameralar	Termal radyasyonu algılar. Isıl kameralar, 7.5–14 nm dalga boyu aralığında çalışır ve 0.05 °C ile 0.1 °C arasında termal çözünürlük sunar. Su stresi tespiti ve bitki sağlığı değerlendirmesi için kullanılır. Özellikle erken stresin tespitinde etkili	Su stresi tespiti, sulama verimliliği
LiDAR	3D modelleme için lazer ışınları kullanır. Bu sistemler, yüksek frekanslı lazer darbeleri yayarak mesafeleri ölçer ve ayrıntılı 3D modeller oluşturur. Dronlara monte edildiğinde, tarım alanlarının yüksek çözünürlüklü 3D haritalarıyla biyokütle tahmini ve bitki yapısı analizi gibi uygulamalar için üstün performans sergiler.	Tarım alanlarının hassas haritalaması, biyokütle tahmini
Mikrodalga Sensörler	Mikrodalga sensörler, 1–300 GHz aralığında çalışır ve bitki örtüsünün altındaki toprak koşullarını değerlendirebilir. Bu sensörler, toprak nemini tespit ederek tarımsal su yönetiminde fayda sağlar.	Toprak neminin belirlenmesi,
Hassas Püskürtme Sistemleri	Dronlara monte edilen hassas püskürtme sistemleri, pestisit veya gübrelerin hedefe yönelik uygulanmasını sağlar. Kimyasal kullanımını geleneksel yöntemlere kıyasla %45 oranında azaltabilir.	Pestisit ve gübrelerin hedefe yönelik uygulanması
Çevresel Sensörler	Mikroklimatik koşulları ölçer. mahsullerin mikroklimatik koşulları hakkında değerli veriler sunar.	Hastalık, mahsul yönetim

Çizelge 3. Tespit Amaçlı Dron Kullanımı

Tanı Uygulaması	Açıklama	Anahtar Sonuçlar	Son Araştırmalar
Bitki Sağlığı Değerlendirme	Multispektral sensörler ile bitki üzerinde çıplak gözle görülmeyen streslerin tespiti.	Besin eksiklikleri ve zararlı istilalarının erken tespiti; buğday yoğunluğunda %91 korelasyon ($R^2 = 0.91$).	Abrougui vd., 2022; Sishodia vd., 2020; Jin vd. 2017
Hastalık ve Zararlıların Erken Tespiti	Yapay zekâ ve derin öğrenme ile dron görüntülerinin analizi.	Yabancı otların %93 doğrulukla tespiti; hastalık tespitinde doğruluk oranında önemli artış.	Koganti vd.,2021 Gašparovi´c vd., 2020; Zhao vd., 2021
Su Stresi Analizi	Termal sensörler ile gövde sıcaklığı ölçümü.	Su stresi tespiti için düşük maliyetli cihazlar, yüksek doğruluk	Noguera vd., 2020; Zhou vd. 2021
2D ve 3D Tarla Haritalama	Tarla değişkenliğini analiz etmek için yüksek çözünürlüklü haritalar üretimi.	0.5 cm/piksel mekansal çözünürlük; kıyı ekosistemlerinde deniz atıkları değerlendirmesi.	Tsouros vd 2019; Pádua vd., 2020
Multispektral ve Termal Görüntüleme	Farklı spektral bantlarda görüntü yakalama ve analizi.	Hızlı verim tahmini; su stresinin yüksek doğrulukla tespiti.	Koganti vd., 2021
Toprak Kalitesi ve Nem Analizi	Hiperspektral sensörler ile toprak neminin değerlendirilmesi.	Toprak neminin doğru tahmini; sulama yönetimini optimize etmek için araçlar.	Ge vd., 2019 Thorp vd., 2018
Drenaj Haritalama	Sorunlu drenaj sistemlerinin belirlenmesi.	%90'ın üzerinde doğrulukla drenaj borularının yer tespiti;	Maes vd., 2019 Koganti vd., 2021
Yabancı Ot Tespiti	Yabancı otları tespit etmek için gelişmiş modellerin kullanımı.	%92–95 doğrulukla tespit; hedefe yönelik herbisit uygulaması.	Zhao vd., 2021 Gašparovi´c vd., 2020

Tarımsal dronlar, tarımın çeşitli alanlarında devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. En dikkat çekici faydalarından biri, hassas tarım uygulamalarını mümkün kılmasıdır (Guo, vd, 2024). Hassas tarım, sınırlı kaynakların daha etkin kullanımını ve tarımsal süreçlerin daha doğru yönetilmesini amaçlar. Bu bağlamda, dronlar bitki sağlığı ve toprak analizi, bölgesel ilaçlama ve gübreleme, zararlı ve hastalık tespiti, zaman ve işgücü tasarrufu gibi alanlarda kritik roller üstlenir.

Ekim ve dikim sistemleri, hassas tarımda büyük bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, tohumları 200–300 km/s hızla toprağa fırlatan pnömatik projeksiyon sistemleri kullanır ve zorlu arazilerde bile etkili toprak penetrasyonu sağlar. Dronlar ayrıca tozlaşmaya yardımcı olarak meyve üretiminde verimliliği artırabilir.

Multispektral ve hiperspektral kameralarla donatılmış dronlar, bitkilerin klorofil seviyesini ve genel sağlık durumunu tespit eder. Ayrıca, toprak nem seviyeleri gibi kritik verileri sağlayarak sulama ve gübreleme stratejilerinin optimize edilmesine olanak tanır. Tarımda kullanılan geleneksel yöntemler genellikle gecikmelere yol açarken, dronlar anlık veri sağlayarak erken teşhis imkânı sunmaktadır. Bu sayede, ürün kaybı önlenebilir. Geleneksel tarımsal faaliyetler, büyük arazilerde oldukça zaman alıcı olabilir. Tarımsal alanda kullanılan İHA'lar, bu süreçleri birkaç saat içinde tamamlayarak iş gücü ve zamandan tasarruf sağlar.

İHA'lar, yüksek çözünürlüklü görüntüleme teknolojileriyle tarla ve ot haritalama gibi hassas tarım uygulamaları için kullanılabilir. Bu sistemler, RGB, multispektral ve hiperspektral sensörlerle donatılarak, bitki ve ot türlerini ayrıştırma ve ot yoğunluklarını haritalama imkânı sunar. Örneğin, hiperspektral görüntüleme, yabancı ot türlerini doğru bir şekilde tespit ederek hedefe yönelik herbisit uygulamalarına olanak tanır. Bunun yanında Hiperspektral sensörler, yüzlerce dar bant aralığında veri toplayarak, mahsul ve yabancı ot türlerini ayırt etmede üstün performans sağlar. Bu yöntemler, mahsul verimliliğini artırmak ve herbisit kullanımını optimize etmek için son derece etkili bir çözüm sunar. Multispektral sensörler ise, bitki sağlığı ve ot yoğunluğunu tespit etmek için ekonomik bir alternatif olarak kullanılabilir.

Dron tabanlı görüntüleme sistemleri, tarımsal veri toplamada devrim yaratmıştır. Uçuş yüksekliği ve sensör özelliklerine bağlı olarak 0.6 cm/piksel ile 20 cm/piksel arasında mekânsal çözünürlük sağlanabilmektedir. Bu yüksek çözünürlük, mahsul izlemeyi ve erken stres tespitini kolaylaştırarak tarımsal yönetim uygulamalarını önemli ölçüde geliştirmiştir

Dronlar, yalnızca hastalıklı ya da zararlı istilasına uğramış alanlara

müdahale ederek ilaç ve gübre kullanımını azaltmak suretiyle hem maliyetleri düşürür hem de çevresel zararı minimize ederler (Wang vd, 2024; Chen vd., 2020; Zhou vd., 2024).

Türkiye gibi tarımda büyük ölçekli alanlara sahip ülkelerde bu faydalar oldukça kritiktir (Cunha vd., 2024; Jeeaven vd., 2024). Özellikle Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde dronlar, zeytinlikler, üzüm bağları ve buğday tarlalarında Trakya'da çeltik ekili alanlarda başarıyla kullanılmaktadır.

Dronların tarımsal üretime entegrasyonu henüz başlangıç aşamasında olmasına rağmen, gelecekte bu teknolojinin sunduğu imkanlar daha da genişleyecektir. Özellikle otonom dronlar ve yapay zekâ tabanlı analiz sistemleri, tarımda verimliliği artıracak yeni fırsatlar sunmaktadır.

Yapay zekâ entegrasyonu sayesinde, dronlardan elde edilen veriler daha doğru analiz edilecek ve çiftçilere anlık çözüm önerileri sunulacaktır. Gelişmiş dronlar, tamamen otonom hale gelerek ekim, hasat ve tohum serpme gibi görevleri insan müdahalesi olmaksızın gerçekleştirebilecektir.

Tarımsal dronların sulama sistemleriyle entegre edilmesi, mahsullerin büyüme süreçlerini optimize edebilir. Su kaçaklarının tespiti mümkündür (Şener vd., 2019). Ayrıca, coğrafi bilgi sistemleri (GIS) destekli haritalama ile tarım arazilerinin daha etkili yönetimi mümkün hale gelecektir (Şener vd., 2018; Pon Arasan vd., 2024).

3. Dronlarla Pestisit Uygulamaları

İnsansız hava araçlarının (İHA) ilaçlama, gübreleme ve ekim gibi tarımsal uygulamalarda kullanılması, sektörde önemli bir ticari büyümeye yol açmıştır. 2023 yılında tarım İHA'ları sektörünün ticari hacmi 5 milyar dolara ulaşırken, 2030 yılı itibarıyla bu rakamın 18 milyar dolara çıkması öngörülmektedir. Bu hızlı büyümede, özellikle zirai insansız hava araçlarının (ZİHA) pestisit uygulamalarında kullanımının etkisi oldukça büyük olmuştur. ZİHA'ların konvansiyonel havadan veya yerden ilaçlama yöntemlerine kıyasla tercih edilmesinin temel nedenleri arazi yapısı, küçük ve düzensiz araziler, maliyet ve yasal sınırlamalardır. Bunlara

operatörün güvenliği ve erken dönemde yapılan müdahale edilebilirlik eklenebilir.

Pestisit uygulamalarında kullanılan İHA sistemleri, aşağıdaki temel bileşenlerden oluşmaktadır:

- Depolama tankı: Su ve pestisit karışımının depolanması için tasarlanmış tanklar.
- Pompa: Karışımın püskürtme memelerine iletilmesini sağlayan sistem.
- Hortumlar: Pestisit akışını depodan memelere taşıyan bağlantı elemanları.
- Filtreler: Pestisit karışımındaki partikülleri süzerek püskürtme sisteminin verimliliğini artırır.
- Püskürtme memeleri: Pestisit karışımını hassas bir şekilde bitki yüzeyine uygulayan bileşenler.
- Akış ölçer ve otonom ayar sensörleri: Karışımın debisini kontrol eden ve uygulama sırasında hassasiyet sağlayan sensörler.
- Konum sensörleri: GPS, GNSS ve RTK gibi sistemler, İHA'nın konum doğruluğunu artırır.
- Mesafe ve engel sensörleri: RADAR, LiDAR ve ultrasonik sensörler, engellerden kaçınma ve doğru mesafede uygulama yapma yeteneği sağlar.

Pestisit uygulamaları için geliştirilen ilk İHA Japon Yamaha firmasının R-Max modeliydi. 1997 yılında piyasaya sürülen model, benzinli motora sahip olup, üzerinde 20 litrelik ilaç tankı ve 4 adet püskürtme memesi bulunmaktaydı. Sonraki yıllarda ise elektrikle çalışan, üzerinde bir batarya ve her kanada tahrik veren elektrikli rotorlar bulunan İHA'lar piyasaya sürüldü. Günümüzde dörtgen, altıgen, sekizgen şeklinde yerleştirilmiş 4, 6 ve 8 rotora sahip İHA'lar kullanılmaktadır. Rotorların dönme etkisiyle oluşan aşağı yönlü hava akımı damlaların aşağı yönlü hızlanıp geniş alana yayılmasına olanak sağlamaktadır. İlk versiyonlarda konvensiyonel

yelpaze hüzmeli püskürtme memeleri kullanılıyorken, son çıkan modellerde döner diskli memeler tercih edilmeye başlanmıştır. Bunun sebebi ise, farklı hava koşulları, uçuş parametreleri ve pestisit tipleri için farklı damlacık boyutlarının ayarlanabilmesinin mümkün olmasıdır. Günümüzde İHA'ları birbirinden ayıran başlıca özellikler;

- Rotor sayısı,
- Rotorların konumları,
- Memelerin konumları ve özellikleri,
- Memelerin tipi,
- Meme sayısı,
- Memeler arası mesafe,
- Rotor ve meme arası dikey uzaklık,
- Kalkış ağırlığı veya tank kapasitesidir.

Farklı İHA'lar arasındaki bu farklılıklar her İHA'nın kendi püskürtme karakteristiğine sahip olmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden her bir İHA'da en verimli uygulama elde etmek için farklı parametreler gereklidir. Dünya'da ve Türkiye'de birçok araştırmacı insansız hava araçlarının pestisit uygulamalarına adaptasyonu, uygun parametrelerin belirlenmesi, konvensiyonel teknolojilerle arasındaki farklarının tespiti amacıyla birçok çalışma yürütmüştür.

İHA'larla pestisit uygulamalarında verimli bir uygulama için damla dağılım düzgünlüğünün yüksek olması, diğer bir ifade ile, damlaların hedef yüzeye eşit bir şekilde dağılması beklenmektedir. İlaçlama tekniğinde bu düzgünlüğü etkileyen faktörler basınç, püskürtme normu, meme tipi, meme büyüklüğü, ilerleme hızı, meme ile hedef arasındaki mesafe, rüzgâr, nem, sıcaklık gibi meteorolojik ve teknik parametrelerdir. İHA'larda ise bu duruma ek olarak uçuş yüksekliği, kalkış ağırlığı, rotor tipi, rotorların yerleşimi ve sayısı, çalışma genişliği ve uçuş hızı parametreleri de eklenmektedir. En verimli püskürtmenin yapıldığı İHA uçuş parametrelerinin belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan en kapsamlı olanları Çizelge 4.'de gösterilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere, farklı İHA tipleri, farklı meme tipleri ve farklı rotor dizilimlerinde en uygun parametreler farklı olmaktadır. Özetle, her İHA için farklı uçuş parametreleri önerilmelidir.

İnsansız hava aracı ile yapılan herbisit uygulamaları, konvensiyonel uygulamalarla karşılaştırıldığında, yabancı otlarla mücadelede benzer veya daha iyi yabancı ot kontrolü performansı göstermişlerdir (Çizelge 5). Ancak bu başarıyı yakalamak için, farklı İHA'larla farklı uçuş ve uygulama parametreleri kullanılmıştır. Bu da her uygulama tipi için farklı parametreler gerektiğini bir kez daha göstermiştir. Herbisit uygulamalarında da en büyük zorluklar arasında sürüklenme ve yoğun kanopide penetrasyon ve damla dağılımının düşük olabilmesidir.

Çizelge 4. İHA'lar ile Pestisit Uygulamalarında Parametre Belirleme Çalışmaları.

İHA Modeli	**PN (L/ha)**	**UY (m)**	**UH (m/s)**	**Meme Tipi**	**Yazarlar**
Freeman-200	10	2	2	TeeJet110055	Ahmad vd. 2020
DJI Agras MG-1	15	2.5	3	XR110-01	Martin vd. 2019
Hexacopter	5	1.5	1	Single flat	Chojnacki & Pachuta 2021
Six-rotor UAV	63.5	3.5	7	Yelpaze Hüzmeli Meme	Wang vd. 2024
3WWDZ-10A Quad-Rotor	15	3	4	Disk Meme	Zhang vd.. 2020
DJI Agras MG-1P	10	1.5	2	Teejet XR11001VS	Özyurt vd. 2022
DJI Agras MG-1P	20	2.5	2	Teejet XR11001VS	Önler vd. 2023

PN: Püskürtme normu; UY: Uçuş yüksekliği; UH: Uçuş Hızı

Fungisit uygulamalarında İHA'larda yaşanan en büyük problem yaprak yüzeylerindeki kaplama oranıdır. Araştırmacılar, İHA'lar ile konvensiyonel uygulamaları karşılaştırarak, benzer koşullarda fungisit uygulamalarında İHA'ların kullanılabilirliğini incelemişlerdir (Çizelge 6). Yapılan çalışmaların çoğunda insansız hava araçları ile yapılan uygulamalar konvensiyonel uygulamalarla

benzer başarı veya üstünlük göstermiştir. Ancak rüzgarla damla sürüklenmesi ve damla birikim yoğunluğunun değişkenliği en büyük zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bitkilerde insektisit kullanım verimliliğini artırmak için, uçuş hızı, uçuş yüksekliği, meme tipi, taşıma yükü ve drone tipi gibi dron operasyonel parametreleri verilen durum için optimize edilmelidir. Genel olarak, Çizelge 7'de görüleceği gibi 2-3 m uçuş yüksekliği, 3-5 ms^{-1} uçuş hızı, pestisit uygulaması yapmak için en uygun olduğu bulunmuştur. İnsektisit ile yapılan çalışmalarda da insansız hava araçları, konvensiyonel makinelerle benzer performans göstermişlerdir. Bazı çalışmalarda zorluklar belirtilmese veya yaşanmasa da, genel problem diğer pestisit uygulamalarında olduğu gibi penetrasyon ve sürüklenmedir.

Çizelge 5. Dronlar ile Herbisit Uygulamalarına Yönelik Çalışmalar

İHA Modeli	PN (l/ha)	UY (m)	UH (m/s)	Herbisit	Karşılaştırılan Makine	Sonuç	Dezavantajlar	Yazarlar
DJI MG-1P	60	2	5	Pendimethalin	Sırt Atömizörü	Daha az pestisit ile daha etkin uygulama	Yüksek hızlı rüzgarlarda drift tehlikesi ve düşük birikim	Ramesh vd. 2023
DJI Agras T20	20	2	5	Pyrazosulfuron-ethyl	Sırt Atömizörü	Benzer yabancı ot kontrol etkinliği	Yoğun kanopide düşük kaplama oranı riski	Jeevan vd. 2023
DJI MG-1S	15	2	3	Penoxsulam + Cyhalofop-butyl	Sırt Atömizörü	Daha az pestisit ile daha etkin uygulama	Düşük püskürtme hacimlerinde azalan etkinlik	Madhusree vd 2023
DJI Agras T10	60	2	5	Pyrazosulfuron-ethyl	Sırt Atömizörü	Benzer yabancı ot kontrol etkinliği	Arazi engebesindeki değişkenlik damla dağılım düzgünlüğünü etkiliyor	Jeevan vd 2023
AD610D	40	2	5	Pendimethalin	Sırt Atömizörü ve Tarla Pülverizatörü	Benzer yabancı ot kontrol etkinliği	Yabancı otların görüntülenmesinde iş gücü gerekli	Hiremath vd. 2023
V6A (RPAAS)	18,7	3	4	Fluorescent dye (water simulation)	Sırt Atömizörü	Daha düzgün damla dağılımı ile benzer yabancı ot kontrol etkinliği	Kanopi içine kadar damla birikimi için özel memeler gerekli	Martin vd. 2020
DJI MG-1S	25,8	1,5	4	Chlorfenapyr	Sırt Atömizörü	Daha iyi damla dağılımı ve yabancı ot kontrol etkinliği	Yoğun kanopide düşük birikim	Wu vd. 2023
Model Belirtilmemiş	25	2,5	5	Metribuzin 70% WP	Sırt Atömizörü	Daha iyi yabancı ot kontrol etkinliği ve düşük herbisit dozu	Düşük hacimli uygulamalarda sürüklenme riski	Pranasvi vd. 2022

PN: Püskürtme normu; UY: Uçuş yüksekliği; UH: Uçuş Hızı

Çizelge 6. Dronlar ile Fungisit Uygulamalarına Yönelik Çalışmalar

İHA Modeli	PN (l/ha)	UY (m)	UH (m/s)	Fungisit	Karşılaştırılan Makine	Sonuç	Dezavantajlar	Yazarlar
DJI Agras MG-1P	10	2	5	Bixafen + Prothioconazole + Trifloxystrobin	Tarla Pülverizatörü ve Sırt Atömizörü	Benzer performans	Yoğun kanopide homojen olmayan damla dağılımı	Silva vd. 2022
EA-30X AI	0,84-1,67	2,7	0,5	Difenoconazole + Propiconazole	Yardımcı Hava Akımlı Pülverizatör, Sırt Atömizörü	Zaman ve kullanım yönünden daha verimli	Alt yapraklarda düşük damla birikimi	Wiangsamut vd. 2024
DJI Agras T16	10	2	7	Picoxystrobin + Benzovindiflupyr	Tarla Pülverizatörü	Benzer performans	Rüzgarlı havalarda sürüklenme riski	Wang vd. 2022
UAV Sprayer	9	2	5	Wheat aphid + powdery mildew	Elektrikli Sırt Atömizörü	Yüksek normlarda benzer performans	Düşük hacimli uygulamalarda düşük etkinlik	Wang vd. 2019
Aerial Sprayer	21	1.5	3.47	Pyraclostrobin + Metconazole	Tarla Pülverizatörü	Alt yapraklarda daha az birikim	Yoğun kanopide düşük birikim	Penney vd. 2020
DJI Agras MG-1P	5	2.5	5	Cyproconazole	Pnömatik Sırt Atömizörü	Alt yapraklarda daha az birikim	Engebeli arazilerde sınırlı kaplama oranı	Victória vd. 2023
DJI Agras MG-1P	20	2	5	Prochloraz + Trifloxystrobin + Cyproconazole	Tarla Pülverizatörü	Benzer performans, çok az daha	Alt yapraklarda düşük damla birikimi	Köycü vd. 2023

PN: Püskürtme normu; UY: Uçuş yüksekliği; UH: Uçuş Hızı

Çizelge 7. Dronlar ile İnsektisit Uygulamalarına Yönelik Çalışmalar

İHA Modeli	PN (l/ha)	UY (m)	UH (m/s)	İnsektisit	Karşılaştırılan Makine	Sonuç	Dezavantajlar	Yazarlar
DJI MG-1S	30	2	5	Chlorpyrifos	Sırt Atömizörü	Daha verimli ve daha iyi kaplama	Alt yapraklarda az damla birikimi	Wu vd. 2021
Fixed Wing UAV	15	3	6	Lambda-cyhalothrin	Fixed-wing aerial	Benzer zararlı kontrolü, İHA uygulamasında daha iyi dağılım	Damla spektrumundaki değişkenlik sonucu sürüklenme riski	Li vd. 2021
DJI Agras T16	20	2,5	4	Imidacloprid	Tarla Pülverizatörü	Alt yapraklarda daha verimli	Düşük püskürtme normu etkinliği düşürmekte	Wang vd. 2019
Octocopter	40	1,8	5,5	Deltamethrin	Yok	Etkili kaplama ve kontrol, özellikle yoğun yapraklı bölgelerde	Değişken damla yoğunluğu, bazı bölgelerde düşük etkinlik	Zhang vd. 2020
3WTXC8-5 UAV	10	1	3	Chlorpyrifos	Tarla pülverizatörü ve sırt atömizörü	Benzer zararlı kontrol etkinliği, daha verimli çalışma	Belirgin bir dezavanjtaj yok	Wang vd. 2019
XAG P30	5	4	6	Acetamiprid, Bifenthrin	Yok	Citrus psyllid zararlısı ile mücadelede %80 ölüm oranı	Belirgin bir dezavantaj yok	Miranda vd. 2023
3WQF120-12 UAV	28,1	3	5,5	Imidacloprid, Lambda-cyhalothrin	Sırt Atömizörü	Benzer zararlı mücadesi etkinliği	Homojen bir damla dağılımı elde etmek zor	Hu vd. 2021

PN: Püskürtme normu; UY: Uçuş yüksekliği; UH: Uçuş Hızı

4. Dronlarda Kullanılan İleri Teknolojiler ve Tarımda Uygulama Alanlar

Dronlar artık tarımdaki izleme ve teşhis işlevlerinin ötesine geçerek mahsullere doğrudan müdahale etme konusunda önemli bir rol oynamaktadır.

Dronlarla sıvı gübre uygulaması, geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj sunmaktadır. Gübre tüketimi %30'a kadar azaltılabilir ve aynı zamanda verimlilik artırılabilir. Dronlarla sıvı gübre uygulaması, %90–95 doğruluk oranıyla yapılabilir ve besinlerin daha eşit şekilde dağılması sağlanır (Souvanhnakhoomman, 2021; Satendra vd., 2023).

Dron sürüleri ile doğrudan ekim teknolojisi, ekim süreçlerinde verimliliği artırmaktadır. Mekanik ve pnömatik yöntemlerle tohumların etkili şekilde dağıtılması sağlanır. Ayrıca Tohum Kapsülleri, tohumların çimlenme oranlarını artırmak için geliştirilmiştir.

Tozlaşma dronları, gelişmiş bilgisayarlı görme ve derin öğrenme teknikleri kullanarak çiçekleri doğru bir şekilde tespit edebilir ve tozlaşmayı optimize eder. Tozlaşma dronları, doğal tozlayıcıları tamamlayıcı bir araç olarak kullanılabilir. Ancak, biyolojik çeşitliliği koruma gerekliliği göz önünde bulundurularak, teknolojiye aşırı bağımlılıktan kaçınılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Yapay zekâ (AI), dronlarla ekim işlemini optimize etmek için kullanılmaktadır. Dron görüntüleri ve çevresel veriler analiz edilerek, en uygun ekim noktaları belirlenir. Topografya, güneş ışığı ve drenaj gibi faktörlere göre ekim parametreleri ayarlanabilmektedir.

Dronlarla pestisit ve herbisit uygulaması, daha hızlı ve etkili bir uygulama sağlar. Dronlar hedefe yönelik uygulamalarla pestisit kullanımını %40'a kadar azaltabilir. Dronlarla geleneksel yöntemlere göre 5 kat daha hızlı püskürtme yapabilir ve geniş alanlar kısa sürede ilaçlanabilir (Gayathri, vd., 2020).

Dronlarla faydalı böceklerin (ör. Trichogramma spp.) salınımı, geniş

alanlarda hassas ve eşit bir şekilde yapılabilir. Bu, geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli bir biyolojik mücadele sağlar. Steril sivrisineklerin (ör. Aedes spp.) salınımı gibi uygulamalar hem şehir hem de kırsal alanlarda dronlarla yapılabilir. Bu yöntem, vektör kaynaklı hastalıklarla mücadelede etkili bir araçtır.

Dronların GIS, IoT ve Yapay Zekâ gibi ileri teknolojilerle entegrasyonu, hassas tarımı daha verimli ve sürdürülebilir bir seviyeye taşımaktadır. Bu teknolojiler, kaynak kullanımını optimize ederken, mahsul sağlığı ve verimliliğini artırmak için daha doğru ve zamanında müdahalelere olanak tanır. Dronların diğer ileri teknolojilerle entegrasyonu, hassas tarımda yeni perspektifler açarak entegre çiftlik yönetiminde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır.

Dronların Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) ile entegrasyonu, tarımsal operasyonların haritalanması ve mekânsal analizi için önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Dronlar ve GIS entegrasyonu, santimetre hassasiyetinde haritalar oluşturarak kaynakların daha doğru yönetilmesine olanak sağlar. GIS tabanlı analizlerle birlikte dronlar, arazi koşullarının gerçek zamanlı izlenmesini ve tarımsal müdahalelerin daha iyi planlanmasını sağlar. GIS ile entegre edilen dronlar, sadece tarımsal alanlarda değil, kıyı ekosistemlerinde atık izleme gibi çevresel yönetim uygulamalarında da kullanılmaktadır (Quamar vd., 2023).

Dronlar ve IoT cihazları, pirinç tarlalarında hastalıkların erken tespiti ve konum haritalama gibi uygulamalarda kullanılmıştır. IoT tabanlı dronlar, mahsullerin çeşitli parametrelerini izleyerek tarımsal uygulamaların optimize edilmesine yardımcı olur. Yapay zekâ ve IoT'nin entegrasyonu, tarımsal verilerin analiz edilmesi ve zamanında kararlar alınması için sağlam bir temel oluşturur.

Yapay Zekâ (AI), dronlardan toplanan verilerin işlenmesi ve analiz edilmesinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır. Makine öğrenimi algoritmaları, bitki hastalıklarını erken aşamalarda tespit edebilir ve mahsul yönetim kararlarını iyileştirir. Yapay zekâ tabanlı modeller, dron görüntülerini kullanarak mahsul verimini doğru bir şekilde tahmin edebilir ve kaynak planlamasını optimize edebilir. Yapay zekâ, toplanan verileri işleyerek, pestisit veya gübre

uygulamasını hedefe yönelik yapar ve çevresel etkileri en aza indirir

Dronların topladığı veriler, mahsul durumunu analiz ederek hasat planlamasının optimize edilmesine yardımcı olur. Farklı bölgelerdeki drone uygulamaları incelenerek tarımsal verimlilikteki farklılıklar tespit edilebilir ve planlama iyileştirilebilir. Etkili ve ekonomik zararlı kontrolü sağlanabilir.

5. Tarımda Dronların Geleceği

Dron teknolojisinin geleceği, yenilikçi sensörler, otonom sistemler, enerji verimliliği, düzenleyici çerçeveler ve eğitim programları ile şekillenecektir. Dronların hassas tarımdaki rolü, teknolojik ilerlemelerin yanı sıra çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkıda bulunarak daha da genişleyecektir. Ancak, bu potansiyelin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için teknolojik gelişmelerin yanında politika, altyapı ve eğitimle ilgili zorlukların da ele alınması gerekmektedir.

Hassas tarımda dron teknolojileri, tarımsal üretkenliği ve sürdürülebilirliği artırmaya yönelik büyük bir potansiyel sunmaktadır. Ancak bu teknolojinin tam potansiyeline ulaşması, çeşitli zorlukların aşılması ve gelecekteki gelişmelerin stratejik bir şekilde ele alınmasını gerektirir.

Dronlar üzerindeki sensörler, gelecekte daha hassas ve çok yönlü veriler sağlayacak şekilde geliştirilecektir. Daha küçük ve daha hafif sensörler, dronların taşıma kapasitelerini artıracak ve daha uzun uçuş süreleri sağlayacaktır. Multispektral ve hiperspektral sensörler, tarım uygulamalarında daha ayrıntılı analizler sunmak için yeni spektral bantları kullanacaktır. Sensörler, değişen ışık ve çevre koşullarına otomatik olarak uyum sağlayacak şekilde geliştirilecektir.

Dron teknolojisinin en büyük potansiyellerinden biri, otonom sistemlerle tamamen entegre edilmesidir. Dronlar, insan müdahalesi olmadan uçuş rotalarını belirleyip görevlerini yerine getirebilecektir. Yapay zeka destekli sistemler, dronlardan toplanan verileri gerçek zamanlı olarak analiz edebilecek ve sonuçlara dayalı aksiyonlar alabilecektir. Birden fazla dronun koordinasyon içinde çalışarak

geniş tarım alanlarını daha kısa sürede taraması sağlanacaktır.

Gelecekte, dronların enerji verimliliği artırılarak daha uzun uçuş süreleri ve daha geniş kapsama alanları sağlanacaktır (Çizelge 8). Güneş panelleriyle donatılmış dronlar, uçuş sırasında kendilerini şarj edebilecek ve daha uzun süre görev yapabilecektir. Elektrik ve yakıt sistemlerini birleştiren hibrit dronlar, özellikle geniş tarım arazilerinde daha uzun süreli operasyonlara olanak tanıyacaktır.

Çizelge 8. Hassas Tarım-İHA-Gelecek

	Gelişmekte olan yönleri	**Zorluklar**
Sensör Teknolojileri	Boyut, ağırlık, spektral özellikleri	Yüksek maliyetler, sensörlerin dayanıklılığı artırılması ihtiyacı.
Otonom Sistemler	Otonom uçuş, sürü sistemler, karar destek sistemleri	Otonom sistemlerin güvenilirliği ve düzenleyici onayı.
Enerji Verimliliği	Batarya (Güneş enerjili ve hibrit), uçuş süresi	Enerji sistemlerinin maliyeti ve entegrasyon zorlukları.
Mevzuat	Görüş hattı ötesi ve hava sahası düzenlemeleri.	Katı düzenlemeler ve bölgesel farklar.
Eğitim ve Bilgi Paylaşımı	Çiftçi ve operatör eğitim programları	Eğitim maliyetleri, teknolojiyi benimsemede yerel engeller.
Veri ve yapay zekâ	Gelişmiş yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarının tarımsal veri analizine entegrasyonu.	Veri gizliliği ve güvenlik endişeleri, yapay zeka modellerinin karmaşıklığı,

Dronların ticari ve tarımsal kullanımı, düzenleyici politikaların daha esnek hale getirilmesini gerektirmektedir. Dronların tarımda daha etkin kullanılabilmesi için hava sahası düzenlemelerinin sadeleştirilmesi gerekmektedir. Dronların görüş hattı ötesi uygulamalarının yaygınlaştırılması, bu teknolojinin daha verimli kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Dron teknolojilerinin tarım sektöründe benimsenmesini artırmak için eğitim programları ve bilgi paylaşımı kritik önem taşımaktadır. Çiftçilere dron teknolojisinin kullanımı ve avantajları hakkında bilgi verilmelidir. Farklı ülkelerdeki araştırma ve geliştirme projelerinin

bir araya getirilmesiyle teknoloji transferi hızlandırılabilir.

Hassas tarımda insansız hava araçlarının gelecekteki gelişim yönelimleri ve bu gelişmelerin tarımsal faaliyetler üzerindeki potansiyel etkileri özetlenmektedir. Bu ilerlemeler, teknolojinin etkinliğini ve kullanım alanlarını genişletmenin yanı sıra, sürdürülebilir tarımsal üretim için önemli fırsatlar sağlamaktadır. Bu teknolojilerin yaygınlaşması, Türkiye gibi tarım odaklı ekonomilere sahip ülkelerde önemli bir dönüşüm yaratacaktır. Özellikle iklim değişikliği gibi küresel tehditlere karşı daha dayanıklı bir tarımsal sistem kurulmasına olanak tanıyacaktır.

Türkiye'de dronların tarıma entegrasyonunda bazı zorluklarla karşılaşılmaktadır. Bu sorunlar;

- Dronların tarımsal kullanımına ilişkin düzenlemeler belirsizdir. İlaçlama dronlarının ruhsatlandırılması, kullanım izinleri ve operasyon standartları gibi konular hala tam olarak netleşmemiştir. Özellikle üniversiteler ve Araştırma enstitülerinde yürütülen çalışmalar paylaşılmalıdır.
- Dronların ilk yatırım maliyeti, birçok çiftçi için ulaşılabilir değildir. Bu durum, teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır.
- Çiftçilerin büyük bir kısmı, dronları etkin bir şekilde kullanmak için gerekli teknik bilgiye sahip değildir. Özellikle kırsal bölgelerde, bu konuda eğitim programlarının eksikliği hissedilmektedir. Üniversitelerde İnsansız Hava araçları ile yapılan tarımsal mücadele eğitimi müfredat içerisinde mutlaka olmalıdır.
- Kırsal alanlarda internet erişimi gibi dijital altyapı eksiklikleri, dronların tam kapasiteyle kullanılmasını engellemektedir.
- Türkiye'nin dağlık yapısı ve değişken iklim koşulları, dronların kullanımını teknik açıdan zorlaştırabilir. Örneğin, yüksek rüzgar hızları ve nem, operasyonel verimliliği düşürebilir.

Bu sorunların çözümü için kamu kurumları, üniversiteler ve özel sektör iş birliği yapmalıdır. Özellikle, eğitim programlarının artırılması ve teknolojinin çiftçilere daha uygun fiyatlarla sunulması, Türkiye'de dron kullanımını yaygınlaştırabilir.

6. Sonuç

Tarım sektöründe dronların kullanımı, üretim süreçlerinde devrim niteliğinde bir dönüşümü mümkün kılmaktadır. Daha verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir tarım anlayışı için bu teknoloji vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Türkiye gibi tarımsal üretim açısından stratejik bir konuma sahip ülkelerde, dronların etkili kullanımı hem ekonomik kazançlar hem de çevresel faydalar sağlayabilir. Ancak, bu potansiyelin tam anlamıyla hayata geçirilmesi için mevzuat, eğitim ve altyapı alanlarındaki sorunların çözülmesi gerekmektedir. Tarımsal üretimde dronların yaygınlaşması, sadece çiftçilerin değil, tüm tarım ekosisteminin faydasına olacaktır.

Tarımda İHA kullanımı, yüksek maliyetler ve kısıtlı uçuş süreleri gibi bazı teknik engellerle karşılaşabilir. Ancak, yapay zeka ve derin öğrenme algoritmalarının entegrasyonu ile bu sistemlerin daha etkili ve erişilebilir hale gelmesi beklenmektedir. Gelecekte, hafif malzemelerle donatılmış daha dayanıklı İHA'ların, geniş ölçekli tarım operasyonlarında yaygın olarak kullanılması öngörülmektedir.

Dronlar, tarımsal uygulamalarda verimliliği ve sürdürülebilirliği önemli ölçüde artırmıştır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, tarımsal işlerde hız artışı (diğerlerine göre %68 daha hızlı), maliyet düşüşü, %90'a varan veri doğruluğu, iş gücünden tasarruf sağlamaktadır. Yeni teknoloji ve uygulamalara entegrasyonu, çevresel olumsuz etkilerinin azaltılması yönünde çalışmalar yapılmalıdır. Bu teknolojilerin daha yaygın bir şekilde benimsenmesi için maliyet, teknik bilgi ve düzenleyici kısıtları konularının çözülmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

Abrougui, K., Guebsi, R., Ouni, A., Boughattas, N.E., Habel, F., Barkaoui, Y., Amami, R., Khemis, C., Abdou, B. & Chehaibi, S. (2022). Contribution of UAV-airborne imagery in the study of machine-soil-plant interaction in potato cultivation. *J. Oasis Agric. Sustain. Dev*., 4, 71–78

Ahmad, F., Qiu, B., Dong, X., Ma, J., Huang, X., Ahmed, S., & Chandio, F. A. (2020). Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application. *Computers and Electronics in Agriculture*, *172*, 105350.

Chen, Y., Qi, H., Li, G., & Lan, Y. (2019). Weed control effect of unmanned aerial vehicle (UAV) application in wheat field. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2(2).

Chojnacki, J. & Pachuta, A. (2021). Impact of the Parameters of Spraying with a Small Unmanned Aerial Vehicle on the Distribution of Liquid on Young Cherry Trees. *Agriculture*, 11, 1094.

Cunha, J.P.A.R.d., Lopes, L.d.L. & Alvarenga, C.B.d. (2024). Chemical Control of Coffee Berry Borer Using Unmanned Aerial Vehicle under Different Operating Conditions. *AgriEngineering,* 6, 1639–1648. .

Gayathri, D., Sowmiya, N., Yasoda, k., Muthulakshmi, K. & Balasubramanian, K. (2020). Review on application of drones for crop health monitoring and spraying pesticides and fertilizer. *J. Crit. Rev*, 7, 667–672.

Gašparovi´c, M., Zrinjski, M., Barkovi´c, Đ. & Radoˇcaj, D. (2020). An automatic method for weed mapping in oat fields based on UAV imagery. *Comput. Electron. Agric.,* 173, 105385.

Ge, X., Wang, J., Ding, J., Cao, X., Zhang, Z., Liu, J. & Li, X. (2019). Combining UAV-based hyperspectral imagery and machine learning algorithms for soil moisture content monitoring. *PeerJ*, 7, e6926.

Guebsi, R., Mami, S. & Chokmani, K. (2024). Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies, and Challenges. *Drones*, 8, 686.

Guo, Z., Cai, D., Bai, J., Xu,T. & Yu, F. (2024). Intelligent Rice Field Weed Control in Precision Agriculture: FromWeed Recognition to Variable Rate Spraying. *Agronomy*, 14, 1702. https://doi.org/10.3390/

Hiremath, C., Khatri, N., & Jagtap, M. P. (2023). Comparative studies of knapsack, boom, and drone sprayers for weed management in soybean (Glycine max L.). *Environmental Research*, *240*, 117480.

Jeevan N., Pazhanivelan S., Kumaraperumal R. (2024). Impact of different herbicide spray fluids applied using drones on nutrient removal by weeds in transplanted rice. Agronomy, 7(9): 05-09

Jeevan, N., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K., Arthanari, P. M., Sritharan, N., & Manikandan, S. (2023). Effect of different herbisite spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated Unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (Oryza sativa L.). *Journal of Applied and Natural Science*, *15*(3), 972-977.

Jin, X., Liu, S., Baret, F., Hemerlé, M. & Comar, A. (2017). Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. *Remote Sens. Environ*., 198, 105–114

Köycü, N.D., Özyurt, H.B., & Çelen, İ.H. (2023). Comparatıve Performances of UAV and Fıeld Sprayer: Changıng Chlorophyll Content of The Wheat Flag Leaf. 2nd Internatıonal Parıs Congress On Applıed Scıences At: Paris, France

Koganti, T., Ghane, E., Martinez, L.R., Iversen, B.V.& Allred, B.J. (2021). Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Ground Penetrating Radar. *Sensors*, 21, 2800.

Madhusree, S., Ramesh, T., Rathika, S., Meena, S., & Raja, K. (2023). Effect of Drone Application of Pendimethalin on Microbial Population, Nodulation, Weed Control and Yield of Green Gram (Vigna radiata L.). *International Journal of Plant & Soil Science*, *35*(22), 157-164.

Maes, W.H. & Steppe, K. (2019). Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends Plant Sci.,* 24, 152–164.

Martin, D. E., Woldt, W. E., & Latheef, M. A. (2019). Effect of application height and ground speed on spray pattern and droplet spectra from remotely piloted aerial application systems. *Drones*, *3*(4), 1-21.

Martin, D., Singh, V., Latheef, M. A., & Bagavathiannan, M. (2020). Spray deposition on weeds (Palmer amaranth and morningglory) from a remotely piloted aerial application system and backpack sprayer. *Drones*, *4*(3), 59.

Miranda, M. P., Eduardo, W. I., Scapin, M. D. S., Volpe, H. X. L., Rodriguez, G. M., Vizoni, M. C., & Hakvoort, R. B. J. (2023). Insecticide application using an unmanned aerial vehicle for Diaphorina citri control in citrus orchards. *Journal of Applied Entomology*, *147*(9), 716-727.

Li, X., Giles, D. K., Andaloro, J. T., Long, R., Lang, E. B., Watson, L. J., & Qandah, I. (2021). Comparison of UAV and fixed-wing aerial application for alfalfa insect pest control: evaluating efficacy, residues, and spray quality. *Pest Management Science*, *77*(11), 4980-4992.

Noguera, M., Millán, B., Pérez-Paredes, J.J., Ponce, J.M., Aquino, A. & Andújar, J.M. (2020). A New Low-Cost Device Based on Thermal Infrared Sensors for Olive Tree Canopy Temperature Measurement and Water Status Monitoring. *Remote Sens.,* 12, 723

Önler, E., Özyurt, H.B., Şener, M., Arat S., Eker, B., Çelen, İ.H. (2023). Spray characterization of an unmanned aerial vehicle for agricultural spraying. *The Philippine Agricultural Scientist*, *106*(1), 39-46.

Özyurt, H.B., Duran, H., & Çelen, İ.H. (2022). Determination of the application parameters of spraying drones for crop production in hazelnut orchards. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, *19*(4), 819-828.

Pádua, L., Adão, T., Sousa, A., Peres, E. & Sousa, J.J. (2020). Individual Grapevine Analysis in a Multi-Temporal Context Using UAV-Based Multi-Sensor Imagery. *Remote Sens*., 12, 139.

Penney, A. J., Kandel, Y. R., Viggers, J. N., Robertson, A. E., & Mueller, D. S. (2021). Comparison of aerial and ground sprayer

fungicide application technologies on canopy coverage, disease severity, lodging, and yield of corn. *Crop Protection*, *139*, 105393.

Pon Arasan A., Radhamani S., Pazhanivelan S., Kavitha R., Raja R., Kumaraperumal R. (2024): Mapping and monitoring of weeds using unmanned aircraft systems and remote sensing. *Plant Protect. Sci.*

Pranaswi, D., Jagtap, M. P., Asewar, B. V., Gokhale, D. N., & Shinde, G. U. (2022). Weed control efficiency with herbicide application by the combination of Drone and Knapsack sprayer in wheat (Triticum aestivum L.). *Pharma Innov*, *11*, 741-744.

Quamar, M.M., Al-Ramadan, B., Khan, K., Shafiullah, M. & El Ferik, S. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review. *Remote Sens.,* 15, 5039.

Satendra, K., Amit, S., Awaneesh, K. & Ajay, P. (2023). A comparative study on agriculture drone for monitoring and spraying pesticides. *Pharma Innov. J.,* 12, 63–267.

Sishodia, R.P., Ray, R.L. & Singh, S.K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sens.,* 12, 3136.

Souvanhnakhoomman, S. (2021). Review on Application of Drone in Spraying Pesticides and Fertilizers. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT),* 10, 94–98.

Şener M., Pehlivan M., Tekiner M., Alkan Ç., Ozden U. E., Erdem T., Çelen İ.H., Seren A., Aydın S. A., Kolsuz H. U., Seyrek K., Gurescı G., Kose G. & Turan L. (2019). Monitoring of irrigation

schemes by using thermal camera mounted UAVs, *Fresenıus Envıronmental Bulletın*, Vol. 28:6, Pp. 4684-4691.

Şener M., Boyraz Erdem D., Alkan Ç., Çelen İ.H. & Erdem T. (2018). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Agricultural Activity, *Journal of Scientific and Engineering Research,* vol. 5, pp. 137-139.

Thorp, K.R., Thompson, A.L., Harders, S.J., French, A.N. & Ward, R.W. (2018). High-Throughput Phenotyping of Crop Water Use Efficiency via Multispectral Drone Imagery and a Daily Soil Water Balance Model. *Remote Sens.,* 10, 1682.

Tsouros, D.C., Bibi, S. & Sarigiannidis, P.G. (2019). A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*, 10, 349

Victória, E.L.d., Krohling, C.A., Borges, F.R.P., Ribeiro, L.F.O., Ribeiro, M.E.A., Chen, P., Lan, Y., Wang, S., Moraes, H.M.F.e. & Furtado Júnior, M.R. (2023). Efficiency of Fungicide Application an Using an Unmanned Aerial Vehicle and Pneumatic Sprayer for Control of Hemileia vastatrix and Cercospora coffeicola in Mountain Coffee Crops. *Agronomy*, 13, 340.

Wang, P., He, M., Li, M., Yang, Y., Li, H., Xi, W.; Zhang, T. (2024). Optimization of Application Parameters for UAV-Based Liquid Pollination in Pear Orchards: A Yield and Cost Perspective. *Agronomy*, 14, 2033.

Wang, G., Lan, Y., Qi, H., Chen, P., Hewitt, A., & Han, Y. (2019). Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. *Pest management science*, *75*(6), 1546-1555.

Wiangsamut, B., Anutrakinchai, S., Makhonpas, C., & Wiangsamut, M. E. (2021). Efficiency of AI drone, air-blast, and long hose pump sprayers in spraying fungicide to manage leaf sheath blight caused by Rhizoctonia solani in durian. *International Journal of Agricultural Technology,* Vol. 20(4):1687-1708

Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & Han, Y. (2019). Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers. *Applied sciences*, *9*(2), 218.

Wang, G., Lan, Y., Qi, H., Chen, P., Hewitt, A., & Han, Y. (2019). Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. *Pest management science*, *75*(6), 1546-1555.

Wu, J.T., & Yu Tu, J. (2023). Compare Efficacy Between Knapsack Sprayer And UAV Sprayer Application In Chemical Spraying: A Case Study Of Garland Chrysanthemum. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, *9*(3), 342-380.

Zhang, X.Q., Song, X.P., Liang, Y.J., Qin, Z.Q., Zhang, B.Q., Wei, J.J., Li, Y.R., & Wu, J.M. (2020). Effects of Spray Parameters of Drone on the Droplet Deposition in Sugarcane Canopy. *Sugar Tech*, *22*(4), 583-588.

Zhao, J., Berge, T.W. & Geipel, J. (2021). Transformer in UAV Image-Based Weed Mapping. *Remote Sens*., 15, 5165.

Zhou H., Yao W. , Su D., Guo S., Zheng Z. , Yu Z., Gao D., Li H. & Chen C., (2024). Application of a centrifugal disc fertilizer spreading system for UAVs in rice fields. *Heliyon* 10 , e29837

Zhou, Y., Lao, C., Yang, Y., Zhang, Z., Chen, H., Chen, Y., Chen, J., Ning, J. & Yang, N. (2021). Diagnosis of winter-wheat water stress based on UAV-borne multispectral image texture and vegetation indices. *Agric. Water Manag*., 256, 107076

BÖLÜM IV

Tarım Robotlarında Navigasyon Teknikleri

Osman ECEOĞLU [1]
İlker ÜNAL[2]

1. Giriş

Tarım sektöründe otomasyon ihtiyacı, hızla artan dünya nüfusu ve tarımsal iş gücünün azalması gibi etkenlerle giderek büyümektedir. Bu doğrultuda, tarım robotlarının gelişmiş navigasyon sistemleri, tarım uygulamalarında otonom hareket kabiliyeti, engellerden kaçınma ve hassas yönlendirme gibi kritik işlevleri yerine getirebilmeleri açısından büyük önem taşımaktadır (Fountas & ark., 2020). Otonom hareket yeteneği için GNSS (Global Navigation Satellite System) ve VSLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) gibi teknolojiler, robotların konumlarını yüksek doğrulukla belirlemelerini sağlarken; görüntü işleme ve makine görüşü tabanlı sistemler ise özellikle sıra bitkilerinin bulunduğu alanlarda robotların güvenli bir şekilde çalışabilmesi için

[1]Öğr. Gör. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5778-6655, osmaneceoglu@akdeniz.edu.tr
[2] Doç. Dr., Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Burdur/Türkiye. ORCID: 0000-0002-5188-4438, iunal@mehmetakif.edu.tr

yaygın olarak kullanılmaktadır (Radočaj, Plaščak & Jurišić, 2023).

Mobil robot sistemleri, günümüzde hem iç hem de dış tarım ortamlarında daha fazla kullanılmaktadır. İnsan iş gücünü azaltmaları ve operasyonel güvenliği artırmaları nedeniyle dikim, ilaçlama, gübreleme, hasat, seyreltme, yabancı ot temizleme ve tarımsal denetim gibi çeşitli görevlerde bu mobil robotlara duyulan ihtiyaç hızla artmaktadır. Otonom robotların tarım arazilerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için en kritik gerekliliklerden biri, karmaşık ve yapılandırılmamış çevrelerde güvenilir bir navigasyon sistemine sahip olmalarıdır (Shalal & ark., 2013).

Tarım robotları; ağaç sıraları, açık alanlar, engeller ve bitki örtüsü gibi çeşitli arazi özellikleri ile karşı karşıya kaldığından, navigasyon sistemlerinin çevreyi doğru algılayarak hareket rotasını optimize edebilmesi büyük önem taşımaktadır (Bai & ark., 2023).

Tarım robotlarında kullanılan navigasyon teknikleri arasında GNSS tabanlı sistemler yaygın olarak tercih edilmekte ve bu sistemler, yüksek doğruluğu sayesinde geniş tarımsal alanlarda ideal bir çözüm sunmaktadır. Ancak, GNSS sinyalinin yetersiz olduğu arazilerde veya sinyalin engellendiği durumlarda VSLAM gibi alternatif teknolojilere geçiş yapılması gerekmektedir.

VSLAM tabanlı navigasyon sistemleri, tarım robotlarının meyve bahçeleri veya seralar gibi GNSS sinyalinin yetersiz olduğu alanlarda bağımsız bir şekilde hareket edebilmesine olanak tanımaktadır. Bu teknoloji, robotların çevredeki nesneleri tanımlayıp haritalama yapabilmesine imkân vererek, engellerden kaçınmalarını ve güvenli bir rota izlemelerini sağlamaktadır. RTAB-Map (Real-Time Appearance-Based Mapping) gibi görsel tabanlı haritalama sistemlerinin entegrasyonu, robotların çevresel değişiklikleri anlık olarak izlemelerini ve hareket stratejilerini optimize etmelerini kolaylaştırmaktadır. Özellikle dar ve karmaşık alanlarda VSLAM algoritmalarının kullanımı, otonom navigasyonu daha güvenilir bir hale getirmiştir (Shamshiri & ark., 2024).

Tarım robotlarının navigasyon sistemlerinde çoklu sensör teknolojisinin kullanımı, çevresel algının iyileştirilmesinde önemli

bir katkı sağlamaktadır. LiDAR (Light Detection and Ranging), radar ve kamera gibi sensörlerin yanı sıra GNSS ve INS (Inertial Navigation System) sistemlerinin de kullanılması, robotların çevre algısını detaylandırmakta ve hassasiyetini artırmaktadır. Bu sensörler, robotların çevresel faktörleri çok yönlü bir şekilde algılamalarına yardımcı olmakta ve engellerden kaçınma, hedefe ulaşma gibi işlemlerde yüksek doğruluk sağlamaktadır. LiDAR tabanlı algılama teknolojileri, robotların çevresindeki nesneleri üç boyutlu olarak modellemesine olanak tanıyarak, daha güvenli ve doğru bir navigasyon sunmaktadır (Di & Ahamed, 2024).

Sensör füzyonu olarak adlandırılan bu çoklu sensör entegrasyonu, tarım robotlarının çevreye dair kapsamlı bir algı geliştirmelerini ve rota belirleme süreçlerinde bu algıyı kullanmalarını sağlamaktadır. Sensör füzyonunun bir diğer avantajı ise, çevresel veri kaybı veya sinyal kesintisi durumlarında robotların alternatif bir navigasyon yöntemi ile rotasına devam edebilmesidir. Örneğin, GNSS sinyalinin kaybolduğu bir durumda robot, LiDAR ve VSLAM gibi görsel tabanlı sistemlerle hareketini sürdürebilmektedir. Bu durum, tarımsal faaliyetlerin sürekliliğini sağlamada oldukça önemli bir avantaj sunmaktadır (Majumder & ark., 2023)

Makine öğrenimi algoritmalarının tarım robotlarıyla entegrasyonu, bu sistemlerin verimliliğini daha da artırmaktadır. Yapay zekâ destekli algoritmalar, robotların çevresel değişikliklere daha hızlı tepki vermesini sağlamakta ve otonom navigasyon sistemlerini daha akıllı bir hale getirmektedir. Bu algoritmalar, robotların çevresel veriyi analiz ederek karar verme süreçlerini geliştirmekte ve otonom hareket kapasitesini artırmaktadır. Özellikle engellerden kaçınma ve rota optimizasyonu gibi alanlarda yapay zekâ tabanlı algoritmaların kullanımı, tarım robotlarının çalışma performansını yükseltmiştir (Oyebode & Afolalu, 2024).

Bu gelişmeler, tarım robotlarının saha içinde daha kapsamlı görevler üstlenebilmesine imkân sağlamaktadır. Örneğin, yabancı ot tespiti ve temizleme gibi görevlerde kullanılan yapay zekâ algoritmaları, robotların sadece hedef bitkilere odaklanmasını

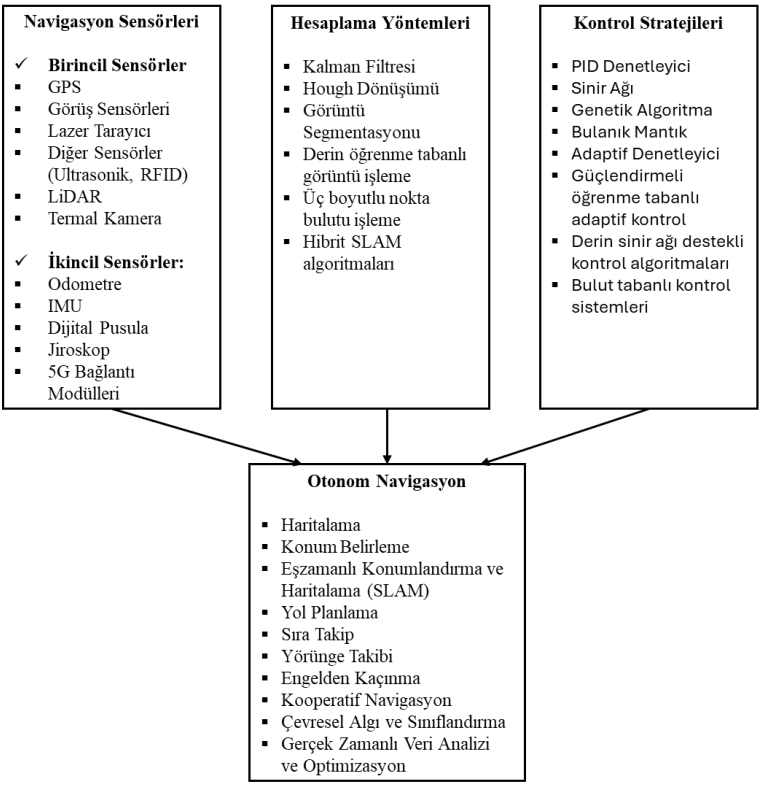
sağlamakta ve istenmeyen otların belirlenerek temizlenmesine yardımcı olmaktadır. Böylece, tarımsal verimlilik artırılmakta ve daha az kaynak tüketilerek daha yüksek bir üretim elde edilmektedir. Bu tür görevlerde yapay zekâ destekli yönlendirme sistemlerinin kullanımı, robotların hassas görevleri güvenilir bir şekilde yerine getirmelerine olanak tanımaktadır (Shiran & Ahamed, 2024).

Yapay zekâ tabanlı sistemlerin entegrasyonunun yanı sıra, çevresel verileri işleyebilen akıllı algoritmalar sayesinde tarım robotları daha esnek ve bağımsız çalışabilmektedir. Çevre algısı güçlü olan bu robotlar, özellikle tarla içi değişkenleri analiz ederek mikro ölçekte kararlar alabilmekte ve tarımsal operasyonları optimize etmektedir. İklim değişiklikleri, toprak nemi veya bitki sağlığı gibi değişkenlerin izlenmesi ile robotlar, gerçek zamanlı veri analizi yaparak operasyonel kararlar alabilmektedir. Bu durum, tarım robotlarının sadece iş gücü tasarrufu sağlamasıyla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkıda bulunmasını da mümkün kılmaktadır (El-Shirbeny & Biradar, 2024).

Tarım robotlarının navigasyon sistemlerinin daha da iyileştirilmesi için insansız hava araçları (İHA) ile entegre çalışabilecek sistemler geliştirilmektedir. İHA'lar, tarımsal arazinin geniş bir alanda izlenmesine ve veri toplanmasına olanak tanıyarak, kara robotlarının daha doğru kararlar almasını sağlamaktadır. Bu entegrasyon, tarımsal operasyonların daha verimli yürütülmesine yardımcı olurken, robotların çevresel değişikliklere uyum sağlama kabiliyetini de artırmaktadır. İHA destekli sistemlerin özellikle geniş arazilerde bitki sağlığı izleme, sulama planlama gibi operasyonel süreçlerde önemli avantajlar sağladığı bulunmuştur (Kumar & Behera, 2024).

Bu gelişmeler ışığında, tarım robotlarının navigasyon sistemleri sürekli olarak ilerlemekte olup, yeni teknolojilerin entegrasyonu ile tarım sektörünün daha verimli, sürdürülebilir ve akıllı bir yapıya dönüşmesi hedeflenmektedir. Tarımsal otomasyonun bu yönde hızla ilerlemesi, dünya genelindeki gıda güvenliğine katkıda bulunarak gelecekteki tarımsal zorlukların üstesinden gelinmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

Tarım mobil robotları için otonom navigasyon sistemi; mobil robot navigasyon sensörleri, hesaplama yöntemleri ve navigasyon kontrol stratejilerinden oluşmaktadır. Şekil 1, tarım mobil robotlarının otonom navigasyon sisteminin temel bileşenlerini özetlemektedir.



Şekil 1: Tarım mobil robotları için otonom navigasyon sisteminin temel unsurları

2. Navigasyon Tekniklerindeki Gelişmeler

Son yıllarda tarım araçlarında kullanılan sensörler, gelişmiş navigasyon teknikleri doğrultusunda çeşitlenmiş ve uygulama alanlarında önemli ölçüde artış göstermiştir. Navigasyon sensörleri, araçların durumuna (konum, yön, hız vb.) ve çevredeki nesnelere dair ayrıntılı bilgi sağlamakta olup, tarım robotlarının otonom olarak

daha güvenli ve verimli çalışmasına olanak tanımaktadır. Özellikle GPS, görüş sensörleri ve lazer tarayıcılar gibi birincil sensörlerin, robotların konumlarını kesin ve güvenilir bir şekilde belirlemekte etkili olduğu saptanmıştır. Bu sensörlerin geniş açık alanlarda yüksek doğruluk sağlayarak robotların belirli tarımsal görevleri bağımsız şekilde yerine getirmelerine olanak tanıdığı görülmüştür.

Gelişmiş tarım uygulamalarında birincil sensörlere ek olarak, odometre, atalet ölçüm birimi (IMU), dijital pusula ve jiroskop gibi ikincil sensörler de birincil algılama sistemlerine destek olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler, robotların konum ve yön bilgilerini daha hassas bir şekilde doğrulamakta ve olası hataları minimize etmektedir. Son yıllarda, LiDAR ve termal kameralar gibi yeni nesil birincil sensörlerin tarım robotları uygulamalarına dahil edilmesi, çevresel algının daha detaylı hale gelmesini sağlamıştır. LiDAR'ın üç boyutlu haritalama kabiliyeti, robotların çevrelerini daha doğru ve kapsamlı bir şekilde tanımlamalarına olanak tanırken, termal kameralar ise bitki sağlığı ve toprak nem durumu gibi çevresel değişkenlerin izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca, 5G bağlantı modüllerinin entegrasyonu sayesinde, robotların veri paylaşımı ve uzaktan yönetimi kolaylaşmış; bu durum, özellikle geniş arazilerde çalışma esnasında veri alışverişini hızlandırarak tarımsal operasyonlarda yüksek verimlilik sağlamıştır. Yeni nesil sensör teknolojileri ile görüntü işleme ve derin öğrenme tabanlı hesaplama yöntemlerinin kullanımı, robotların çevresel engelleri algılamada ve rota belirlemede daha hassas ve hızlı olmasını sağlamıştır. Hibrit SLAM algoritmalarının kullanımı ile GNSS erişiminin yetersiz olduğu ortamlarda, robotların görsel ve LiDAR tabanlı veri ile yön bulması mümkün hale gelmiştir.

Kontrol stratejileri açısından bakıldığında, yapay zekâ destekli adaptif kontrol sistemleri ve güçlendirmeli öğrenme algoritmaları gibi yeni yöntemlerin robotların çevresel değişimlere daha hızlı yanıt verebilmesini sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle güçlendirmeli öğrenme tabanlı adaptif kontrol teknikleri, robotların çevresel koşullara göre hareketlerini optimize etmesini sağlamakta ve bu durum, tarım robotlarının bağımsız hareket yeteneklerini

güçlendirmektedir. Böylece, robotlar yalnızca engellerden kaçınmakla kalmayıp, tarımsal görevleri en verimli şekilde yerine getirecek rotaları da belirleyebilmektedir.

Bu gelişmeler ışığında, sensör teknolojilerindeki ilerlemeler ile navigasyon tekniklerinin tarım sektörüne yönelik otonom çözümler sağlama kapasitesi artmış ve çevresel koşullara uyum sağlayan robotik sistemlerin etkinliği önemli ölçüde geliştirilmiştir.

2.1. GNSS Tabanlı Navigasyon Teknikleri

Tarım robotlarında GNSS tabanlı navigasyon sistemleri, hassas tarım uygulamalarında konum doğruluğunu artırarak işlemlerin daha verimli şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır. GNSS tabanlı çözümlerle sağlanan doğruluğu artırmak amacıyla kullanılan RTK (Real-Time Kinematic) teknolojisinin, robotların ve traktörlerin bitki sıralarını yüksek hassasiyetle izlemesine imkân tanıdığı, bu sayede tarım makinelerinin alan boyunca kesintisiz ve doğru bir biçimde hareket edebildiği belirtilmiştir (Radočaj, Plaščak & Jurišić, 2023).

GNSS'in güvenilirliğini artırmak için GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gibi farklı uydu sistemleri bir arada kullanılmakta olup, çoklu GNSS sistemlerinin hassas tarım robotları için daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğu gözlemlenmiştir (Guo & ark., 2018).

GNSS sistemlerinin IMU ile birleştirilmesi, sinyalin zayıf olduğu alanlarda bile robotların konumlarını güncel tutmalarına olanak tanımakta, böylece yön tayininde güvenilirliği artırmaktadır (Zhang & ark., 2021).

Ek olarak, akıllı GNSS çözümleri, GPS sinyallerinin kesintiye uğradığı durumlarda robotların bağımsız hareket kabiliyetini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Düşük maliyetli GNSS çözümlerine dair araştırmalar, akıllı algoritmalar yardımıyla GNSS doğruluğunun artırılabileceğini ve bu sayede tarımsal robotların geniş alanlarda etkin bir şekilde çalışabileceğini göstermektedir (Wang & ark., 2020).

Bu araştırmalar, GNSS sistemlerinin yalnızca konum doğruluğunu yükseltmekle kalmayıp farklı teknolojilerle entegrasyon yoluyla tarımsal robotların zorlu ve değişken koşullarda güvenilir şekilde çalışmalarını sağlayarak tarım süreçlerinin verimliliğine katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır (Perez-Ruiz, Martínez-Guanter & Upadhyaya, 2021).

Şekil 2'de Eceoğlu ve Ünal (2024) tarafından geliştirilen üzerinde Promark 500 GPS alıcısı bulunan otonom burgu robotu görülmektedir.

Şekil 2: Otonom burgu robotu (Eceoğlu & Ünal, 2024)

2.2. Görsel SLAM (VSLAM) ve Makine Görüşü Tabanlı Navigasyon Sistemleri

Görsel SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), tarım robotları için tasarlanmış bir teknoloji olup, robotların çevreyi algılayarak hem konumlarını belirlemesine hem de çevresini

haritalamasına olanak tanımaktadır. Bu sistem, tarım robotlarının bitki sıralarını, engelleri ve diğer çevresel yapıları algılamasını kolaylaştırmaktadır. Görsel SLAM, kameralar aracılığıyla elde edilen görüntü verilerini işleyerek robotların kendilerini konumlandırmasını sağlamaktadır. Böylece robotlar, tarla veya sera gibi karmaşık tarım alanlarında dinamik engelleri ve bitki sıralarını belirleme konusunda etkinlik kazanmaktadır. Görsel SLAM, tarım uygulamalarında gerçek zamanlı olarak çalışarak robotların çevresel değişikliklere uyum sağlamasına katkı sunmaktadır. Bu teknoloji aynı zamanda görüntü işleme teknikleriyle birleştirilerek tarım robotlarının bitki sağlığı, ürün durumu ve çevredeki nesneleri doğru bir şekilde algılamasını sağlamaktadır (Comelli, Pire & Kofman, 2019).

SLAM teknolojisinin tarım robotlarındaki kullanımını daha da güçlendiren bir unsur ise LiDAR teknolojisinin entegrasyonudur. Qu ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan araştırmada, LiDAR destekli SLAM sistemlerinin tarımsal alanlarda görsel SLAM'e ek olarak daha geniş uygulama alanları sunduğu ve detaylı harita oluşturmada başarı sağladığı ifade edilmiştir. Bu tür bir entegrasyon, özellikle geniş tarım alanlarında bitki sıralarının belirlenmesi gibi görevlerde oldukça yüksek doğruluk oranları sunmaktadır. LiDAR'ın sağladığı derinlik verisi, görsel SLAM'ın algılama yeteneğini artırarak robotların daha detaylı bir çevresel algı geliştirmesini sağlamaktadır (Lv & ark., 2024).

Lv ve arkadaşlarının (2024) çalışmalarında tarım robotları için görsel SLAM sistemlerinin özellikle çevresel değişikliklere uyum sağlama ve dinamik nesneleri ayırt etme konularında başarılı olduğu belirtilmiştir. Bu özellik, tarımsal alanlardaki ağaçlar veya bitki kümeleri gibi sürekli değişen engellerin doğru şekilde algılanması açısından oldukça kritiktir. Shu ve arkadaşlarının (2021), tek kameralı SLAM sistemlerini tarımsal alanlarda inceleyen çalışmaları, bu tür sistemlerin doğrulukla konumlandırma ve haritalama sağlayarak robotların yön bulma kabiliyetlerini geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, Ding ve arkadaşlarının (2022) incelemelerinde,

görsel SLAM tabanlı navigasyonun tarımsal görevlerde doğruluğu artırarak otomatik haritalama gibi görevlerde etkin olduğu bulunmuştur. Görsel SLAM, robotların zorlu tarım ortamlarında güvenilir bir biçimde çalışmasını sağlarken, bitki sıraları boyunca güvenle hareket etme yeteneğini de artırmaktadır.

Bu bulgular bir araya getirildiğinde, görsel SLAM ve görüntü işleme tekniklerinin tarım robotları için güvenilir ve etkin bir çözüm sunduğu görülmüştür. Robotların çevresel değişimlere uyum sağlama, bitki sıralarını algılama, dinamik engellerden kaçınma gibi görevleri, bu sistemler sayesinde daha yüksek doğrulukla yerine getirdiği bulunmuştur. Görsel SLAM'in tarımsal uygulamalarda sağladığı esneklik, çevresel koşullar ne kadar değişken olursa olsun robotların görevlerini başarıyla yerine getirebilmesini sağlamaktadır.

2.3. LiDAR Tabanlı Navigasyon Sistemleri

LiDAR tabanlı navigasyon sistemleri, tarım robotlarının çevrelerini hassas bir şekilde algılamasına ve haritalama yaparak engellerden kaçınmalarına yardımcı olmaktadır. Bu sistemler, özellikle tarımsal ortamlarda robotların güvenli ve verimli bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadır. Nehme ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, üzüm bağlarında otonom olarak hareket eden bir tarım robotunun LiDAR tabanlı navigasyon sistemi sayesinde sıra izleme ve engel algılama yeteneğini kazandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, LiDAR teknolojisinin üzüm bağları gibi karmaşık alanlarda tarımsal uygulamalar için etkili bir çözüm sunduğu bulunmuştur.

Jiang ve arkadaşları (2022), seralarda kullanılan 3D ve 2D LiDAR SLAM sistemlerinin tarım robotlarına geniş açılı bir görüş ve yüksek doğrulukta haritalama sağladığını rapor etmişlerdir. Bu sistemin, seralarda bitki sıralarını ve diğer yapıları tanıyarak robotların bağımsız hareket kabiliyetini artırdığı gösterilmiştir. Bu araştırma, 3D LiDAR'ın seralarda robotların konumlandırılmasında etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Velasquez ve arkadaşlarının (2020), çalışmaları ise mısır

tarlalarında kullanılan reaktif navigasyon sistemlerine odaklanmış olup, LiDAR verilerinin tarım robotlarının yön bulmasında yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu sistem, robotların bitki sıralarını takip etmesini sağlarken, dinamik engellerden kaçınmada da başarılı bir performans sunmaktadır.

Galati ve arkadaşlarının (2022), geliştirdiği RoboNav sistemi, 3D lazer sensörlerle donatılarak tarımsal robotlar için hem düşük maliyetli hem de yüksek doğruluk sağlayan bir navigasyon çözümü sunmayı hedeflemektedir. Bu sistem, tarım robotlarının topografyayı hızlı ve ayrıntılı bir şekilde algılamasına olanak tanıyarak, karmaşık arazilerde güvenli ve bağımsız hareket kabiliyeti kazandırmaktadır.

Şekil 3'te LiDAR SLAM tabanlı tarım alanı denetim robotunu görülmektedir.

Şekil 3: LiDAR SLAM tabanlı tarım alanı denetim robotu (Qu & ark., 2024)

Bu araştırmalar, LiDAR tabanlı navigasyon sistemlerinin, tarım robotları için yalnızca doğru konumlandırma sağlamadığını, aynı zamanda dinamik tarımsal koşullara uyum sağlama ve bitki

sıralarını izleyerek güvenli hareket etme yeteneği sunduğunu göstermektedir.

2.4. Makine Öğrenimi, Yapay Zekâ ve Kooperatif Navigasyon Sistemleri

Makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı kooperatif navigasyon sistemleri, tarım robotlarının bağımsız bir şekilde çevresel verileri algılamasını ve bu veriler ışığında yön bulmasını sağlayarak, tarımsal operasyonlarda verimliliği artırmayı hedeflemektedir. Padhiary ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada, makine öğrenimi algoritmalarının, otonom tarım robotlarının çeşitli tarla koşullarında bağımsız olarak yön bulmalarına olanak sağladığı ifade edilmiştir. Bu tür yapay zekâ destekli sistemlerin, robotların arazide bitki sağlığı, engel algılama ve rota belirleme gibi görevlerde daha hassas sonuçlar elde etmesine yardımcı olduğu bulunmuştur.

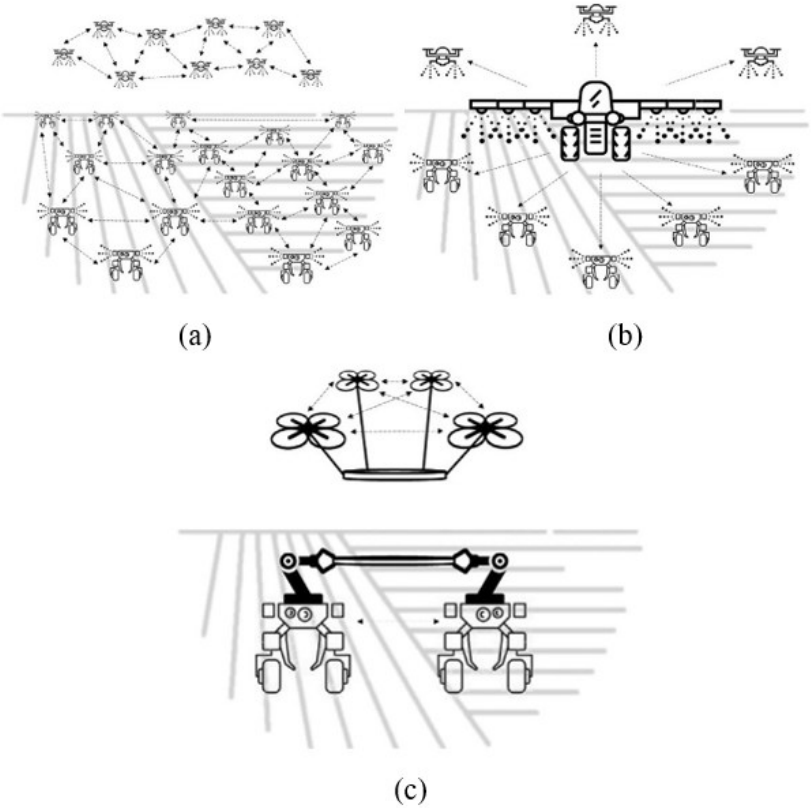
Mammarella ve arkadaşlarının (2022) araştırmasında ise, tarımda iş birliği içinde çalışan robotların kooperatif bir ağ oluşturarak verimli navigasyon sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma, tarımsal alanlarda kullanılan dronlar ve kara araçları arasındaki veri paylaşımının koordineli bir şekilde işlediğini ve bu iş birliğinin robotların görev dağılımında başarılı olduğunu göstermektedir. Bu tür kooperatif sistemler hem otonom navigasyon hem de verimlilik açısından umut verici çözümler sunmaktadır.

Bir diğer önemli araştırma, Espinel ve arkadaşları (2024) tarafından gerçekleştirilmiş olup, derin öğrenme tabanlı görsel işleme algoritmalarının tarımsal haritalama ve bitki analizi gibi görevlerde doğruluğu artırdığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, tarım robotlarının görsel verilerle donatılmasının, tarımsal arazilerde robotların adaptasyon ve analiz yeteneklerini güçlendirdiğini göstermektedir.

Soori ve arkadaşları (2023), tarım robotlarının kooperatif çalışma yeteneklerini derinlemesine inceleyerek, derin öğrenme algoritmalarının robotların kendi aralarında veri paylaşımı yapabilmesini sağladığını belirtmiştir. Bu sayede robotlar, bir araya

gelerek geniş alanların taranmasında ve tarımsal verilerin analizinde daha başarılı olabilmektedir. Kooperatif navigasyon sistemleri, robotlar arasında etkili bir veri alışverişi sağlarken iş birliği kapasitesini artırmaktadır.

Şekil 4a'da görülen yapılandırmada, genellikle benzer veya aynı tür makineler kullanılır ve iş, her bir makinenin bağımsız olarak yerine getirdiği paralel görevlere bölünmektedir. Yabancı ot temizleme robotlarıyla yapılan mekanik yabancı ot kontrolü veya bir grup küçük robotla gerçekleştirilen otonom ekim işlemi bu duruma örnek verilebilir. Görev dağıtımı, operasyon sırasında gerçek zamanlı olarak dinamik bir şekilde güncellenebilir. Şekil 4b'de görülen yapıda, bir veya daha fazla robot, merkezi bir kontrol cihazı tarafından yönetilmektedir. Bu yaklaşım, sahada bir dizi farklı veya ardışık işlemin gerçekleştirilmesi gerektiğinde oldukça etkilidir. Örneğin, biçme ve taşımacılık gibi işlemlerde veya bir biçerdöveri takip eden otonom kara araçlarıyla yapılan sürme işlemlerinde kullanılabilir. Bu durumda, her robota belirli bir görev atanır ve tüm robotların koordineli bir şekilde çalışması gereklidir. Şekil 4c'de görülen yaklaşımda, bir görevin tamamlanması için birden fazla robotun birlikte çalışması gerekmektedir. Bir grup küçük robotun büyük nesneleri taşıması durumu buna örnek olarak gösterilebilir (Mammarella & ark., 2022).



Şekil 4: Kooperatif mimariler: (a) eşler arası; (b) ana-uydu ve (c) takım robotları (Mammarella & ark., 2022).

Bu araştırmalar ışığında, makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı kooperatif navigasyon sistemlerinin, tarım robotları için etkin ve bağımsız bir çalışma ortamı sunduğu ve verimliliği artırarak gelecekteki tarımsal uygulamalarda vazgeçilmez bir rol üstleneceği görülmektedir.

2.5. Çoklu Sensör Birleşim Navigasyon Sistemleri

Çoklu sensör birleşim navigasyon sistemleri, tarım robotları için gelişmiş konumlandırma ve engel algılama işlevleri sunmaktadır. Bu sistemler, farklı sensörlerden elde edilen verileri birleştirerek robotların değişken tarım koşullarında daha güvenilir bir şekilde yön bulmasına ve verimli hareket etmesine olanak

tanımaktadır.

Cheng ve arkadaşlarının (2024) çalışmasında, sera koşullarında mobil bir tarım robotunun çoklu sensör verilerinin birleşimiyle doğruluğu optimize edilmiş bir yönlendirme sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, bir güven optimizasyon algoritması kullanılarak çoklu sensör verilerinin bir araya getirildiği ve sistemin karmaşık çevresel koşullarda başarılı sonuçlar sunduğu ortaya konmuştur.

Zhang ve arkadaşlarının (2024) araştırması, tarlada çalışan tarım robotlarında çoklu sensör verilerinin birleştirilmesi yoluyla engellerin güvenilir bir şekilde algılandığını ve doğruluğun arttığını göstermektedir. Bu çalışma, tarım robotlarının çevresel algılama ve karar verme süreçlerinde çoklu sensör birleşiminin ne denli önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Bir diğer çalışmada Gao ve arkadaşları (2022) tarım robotları için geliştirdikleri sensör birleşim algoritmasının, özellikle GPS sinyalinin yetersiz olduğu alanlarda robotların konum doğruluğunu artırdığını bulmuştur. Çalışmada, IMU ve diğer sensörlerin verilerini birleştirerek robotların çevresel koşullara uyum sağladığı ve yön bulma işlemlerini başarıyla gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Ji ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, tarım alanlarında LiDAR ve kamera verilerinin özellik düzeyinde birleşiminden yararlanılarak, özellikle alt bitki örtüsünde çalışan robotların navigasyon doğruluğunun önemli ölçüde iyileştirildiği ifade edilmiştir. Bu araştırma, tarımsal ortamların düşük görüş koşullarında dahi çoklu sensör birleşiminin avantajlarını gözler önüne sermektedir.

Bu bulgulara göre, çoklu sensör birleşim navigasyon sistemleri, tarım robotlarının çevresel değişkenlere uyum sağlamasında önemli bir araç olarak görülmekte ve gelecekte otonom tarım için güvenilir bir çözüm sunma potansiyeli taşımaktadır.

2.6. Termal ve Spektral Görüntüleme Tabanlı Navigasyon Sistemleri

Termal ve spektral görüntüleme tabanlı navigasyon sistemleri, tarım robotlarının konumlarını belirleyip çevreyi algılamada kullanabilecekleri gelişmiş sistemlerdir. Bu teknolojiler, robotların çevredeki bitki sıralarını, arazi yapısını ve engelleri doğru bir şekilde tanımasına yardımcı olurken aynı zamanda konum doğruluğunu artırarak güvenilir bir yön bulma sağlamaktadır.

Bai ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, termal kameralar ve hiperspektral görüntüleme sensörlerinin, tarım robotlarının geniş tarlalarda bitki sıralarını hassas bir şekilde izleyip araziye uygun yol planlaması yapabilmesi için kullanıldığı rapor edilmiştir. Bu çalışma, termal görüntülerin, çevredeki engellerin tespiti ve çevresel sıcaklık değişikliklerine göre adaptasyon sağlama açısından robotlar için kritik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Messina ve Modica (2020), insansız hava araçlarında (İHA) termal görüntüleme sistemlerini kullanarak geniş alanların haritalanması ve engel tespiti çalışmalarında bu tür sistemlerin etkinliğini vurgulamışlardır. Bu araştırma, termal ve spektral verilerin, tarlalarda konum doğruluğunu artırarak tarım robotlarının araziye uyum sağlamasına katkı sunduğunu göstermektedir.

Bir diğer araştırmada, Calderón ve arkadaşları (2013), tarım robotlarında kullanılan termal ve hiperspektral kameraların, çevredeki topografik engellerin algılanması ve robotların doğru rotada kalması için etkili olduğunu belirtmiştir. Çalışma, bu sistemlerin, robotların çevresel verilerle uyumlu rotalar geliştirmesine olanak tanıdığını vurgulamaktadır.

Loukatos ve arkadaşlarının (2021) araştırması, spektral görüntüleme ve GPS verilerini birleştirerek, robotların tarım alanlarında konum doğruluğunu artırabildiğini göstermektedir. Bu sistemin, özellikle geniş arazilerde doğru konum belirleme ve engelleri önceden tespit etmede robotlara destek sunduğu ifade edilmiştir.

Şekil 5'te, yarı otonom navigasyon ve dayanıklılık

verimliliğini artırmak ve uzaktan termal görüntüleme işlevini daha etkili hale getirmek amacıyla robotik araç platformunun bileşenlerinin yeniden düzenlenerek yerinde test edilmesi gösterilmektedir.

Şekil 5: FLIR E60BX termal kameralı mobil robot

(Loukatos & ark., 2021)

Bu çalışmalar ışığında, termal ve spektral görüntüleme tabanlı navigasyon sistemlerinin, tarım robotlarının çevresel engelleri algılayarak güvenli ve etkin bir navigasyon sağlamalarına katkıda bulunduğu ve geniş alanlarda verimli bir yön bulma sunduğu görülmektedir.

2.7. 5G ve Gelişmiş İletişim Protokolleri ile Uzaktan Yönetim Navigasyon Sistemleri

5G ve gelişmiş iletişim protokollerine dayalı uzaktan yönetim navigasyon sistemleri, tarım robotlarının verimli ve güvenli bir şekilde geniş alanlarda çalışabilmesine olanak tanımaktadır. Bu sistemler, yüksek hızlı veri aktarımı sayesinde robotların çevresel koşulları hızlıca algılamasını ve gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmesini sağlamaktadır.

Majumdar ve arkadaşlarının (2023) çalışmasında, 5G

teknolojisinin tarımsal robotlara getirdiği hızlı veri aktarımı ve düşük gecikme süresi sayesinde robotların çevresel verileri daha verimli işleyebildiği ve uzaktan komutlara anında yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada, tarım robotlarının bitki sağlığı, toprak özellikleri ve nem durumu gibi çevresel değişiklikleri hızlı bir şekilde algılayarak rotalarını optimize edebilmesi incelenmiş ve bu sistemlerin özellikle geniş arazilerde veri aktarımı hızının kritik olduğu durumlarda büyük bir avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Tang ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, 5G ağlarının GPS ile entegre çalışarak tarım robotlarının yönlendirilmesine katkı sağladığı ve bu sayede tarımsal robotların bağımsız hareket kabiliyetinin iyileştirildiği belirtilmiştir. Çalışma, 5G ağlarının sağladığı düşük gecikme süresinin drone'lar ve kara araçları gibi farklı robotik sistemlerin senkronize bir biçimde iş birliği içinde çalışmasına olanak tanıdığını göstermektedir. Özellikle, çiftçiler tarafından anlık olarak değiştirilebilen yol planlamaları gibi esneklik gerektiren operasyonlarda, 5G'nin sağladığı hızlı yanıt süresi ve geniş kapsamın, tarım robotlarının verimliliğini artırdığı ve kaynakları daha verimli kullanma imkânı sunduğu ortaya konulmuştur.

Tomaszewski ve Kołakowski'nin (2023) araştırmasında, 5G ile uzaktan yönetim sistemlerinin, çiftliklerde IoT (Internet of Things) tabanlı cihazlar ve akıllı sensörler ile entegre edilmesinin tarımda verimliliği artırdığına işaret edilmektedir. Çalışmada, bu entegrasyonun tarım robotlarının sensörlerden gelen veriler doğrultusunda kendi rotalarını yeniden oluşturabilmesine olanak tanıdığı, bu sayede anlık değişikliklere hızlıca uyum sağlayarak engellerden kaçınma, bitki sağlığı izleme ve toprağın nem oranını tespit etme gibi çok yönlü işlemler yapabildiği gözlemlenmiştir.

Zhivkov ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan çalışma, tarım robotlarında 5G destekli iletişim protokollerinin, özellikle geniş alanlarda verilerin düşük gecikmeyle aktarımını sağlayarak çiftçilere daha hızlı ve doğru bilgi sağlama konusunda avantaj sunduğunu göstermektedir. Çalışmada, robotların tarımsal alanlarda topografik özelliklere göre yön bulmasını kolaylaştıran 5G destekli

özel ağların, robotların bitki sıraları boyunca daha hassas bir şekilde hareket etmesine ve gerektiğinde veri merkezine kesintisiz veri aktarabilmesine olanak tanıdığı bulunmuştur.

Bu araştırmaların tümü, 5G ve gelişmiş iletişim protokollerinin tarım robotlarında etkin bir navigasyon sağladığını ve robotların hızlı ve güvenilir veri aktarımıyla tarımsal verimliliği artırdığını göstermektedir. Bu sistemlerin gelecekte, geniş arazilerde tarım uygulamaları için vazgeçilmez bir teknoloji olacağı öngörülmektedir.

Şekil 6'da tarım faaliyetlerinde kullanılan 5G destekli otonom robotlar görülmektedir.

Şekil 6:Tarım faaliyetlerinde kullanılan 5G destekli otonom robotlar (Tang & ark., 2021)

3. Sonuç ve Öneriler

Tarım robotlarında kullanılan gelişmiş navigasyon sistemleri, tarım sektöründe otomasyonu destekleyerek iş gücü tasarrufu ve verimliliği artırmakta kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknolojiler, robotların çevresel algı ve konumlandırma yeteneklerini geliştirerek geniş arazilerde güvenli yön bulmalarını mümkün kılmaktadır. GNSS ve VSLAM gibi konumlandırma teknolojileri, açık alanlarda yüksek doğruluk sağlarken; LiDAR ve

spektral görüntüleme gibi sensörler, robotların çevresel değişiklikleri hassas bir şekilde algılamasına yardımcı olmaktadır. GNSS sinyalinin sınırlı olduğu bölgelerde VSLAM ve LiDAR gibi alternatif sistemler devreye girerek robotların güvenilir bir biçimde yön bulmasını sağlamaktadır.

Çoklu sensör birleşimi, robotların çevresel koşullara uyum yeteneklerini geliştirmekte ve karmaşık arazilerde engel tespiti ile güvenli navigasyon gibi görevlerde yüksek doğruluk sunmaktadır. LiDAR'ın sağladığı üç boyutlu haritalama kabiliyeti, bitki sıralarını ve çevresel engelleri doğru bir şekilde algılayarak robotların daha güvenli yön bulmasına yardımcı olurken, termal ve spektral görüntüleme sistemleri de zorlu tarım koşullarında yön bulmayı destekleyerek uyum yeteneklerini artırmaktadır. Ayrıca, makine öğrenimi algoritmaları sayesinde robotlar çevresel değişikliklere daha hızlı uyum sağlayabilmekte; bu algoritmalar engel tanıma, rota planlama ve optimize hareket gibi görevlerde robotlara esneklik kazandırmaktadır. Yapay zekâ destekli bu algoritmalar, robotların bağımsız çalışmasını güçlendirirken kooperatif navigasyon sistemleri ise veri paylaşımıyla drone ve kara araçları arasında koordineli bir çalışma sağlayarak tarım operasyonlarının etkinliğini artırmaktadır.

5G ve gelişmiş iletişim protokolleri, tarım robotlarının uzaktan yönetimini kolaylaştırmakta ve hızlı veri aktarımı ile gerçek zamanlı kontrol imkânı sunmaktadır. Düşük gecikme süresi ile veri akışını destekleyen 5G teknolojisi, geniş tarım arazilerinde drone ve kara robotlarının senkronize bir şekilde çalışmasına olanak tanımakta, aynı zamanda tarım operasyonlarında yüksek verimliliği mümkün kılmaktadır. GNSS, LiDAR ve VSLAM gibi teknolojilerin tek bir kontrol birimi altında entegre edildiği navigasyon sistemlerinin geliştirilmesi, tarım robotlarının daha karmaşık görevleri başarıyla yerine getirmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, 5G'nin yaygınlaştırılması, tarım robotlarının geniş alanlarda daha hızlı ve güvenli bir veri paylaşımı yapabilmesine olanak tanıyacak, böylece uzaktan yönetimin daha etkin bir şekilde sağlanmasına imkân verecektir.

Makine öğrenimi ve yapay zekâ algoritmalarının daha gelişmiş sürümlerle entegre edilmesi, robotların çevresel değişimlere daha hızlı adapte olmasını sağlayacak ve veri analizi ile karar verme süreçlerinde daha yüksek doğruluk elde edilmesine katkı sunacaktır. Kooperatif navigasyon sistemlerinin geniş tarım arazilerinde kullanımı, birden fazla robotun veri paylaşımı ve koordinasyon ile daha verimli yön bulmasına katkıda bulunacak; termal ve spektral görüntüleme sistemleri ise bitki sağlığı, su durumu ve hastalık takibi gibi çevresel analizler için yön bulmayı daha güvenilir hale getirecektir.

Sonuç olarak, tarım robotlarında kullanılan bu gelişmiş navigasyon teknolojileri, tarımsal süreçlerde otomasyonu ve verimliliği desteklemekte olup; GNSS, LiDAR, yapay zekâ, kooperatif navigasyon ve 5G gibi sistemlerin entegrasyonu, tarım robotlarının geniş arazilerde güvenli bir şekilde yön bulmasını sağlamaktadır. Bu teknolojilerin entegre edilerek yaygınlaşması, sürdürülebilir tarım uygulamalarını destekleyecek, dünya genelinde gıda güvenliğine katkıda bulunacak ve gelecekteki tarımsal zorlukların üstesinden gelinmesinde önemli bir çözüm sunacaktır. Tarım robotlarının gelişmiş navigasyon sistemleriyle donatılması, verimliliği artırarak tarım sektöründe daha etkin bir yapıya dönüşüm sağlayacaktır.

4. Kaynaklar

Bai, Y., Zhang, B., Xu, N., Zhou, J., Shi, J., & Diao, Z. (2023) Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, C. 205, s. 107584. Elsevier B.V. Doi: 10.1016/j.compag.2022.107584

Calderón, R., Navas-Cortés, J. A., Lucena, C., & Zarco-Tejada, P. J. (2013). High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, *139*, 231-245. Doi:10.1016/j.rse.2013.07.031

Cheng, B., He, X., Li, X., Zhang, N., Song, W., & Wu, H. (2024). Research on Positioning and Navigation System of Greenhouse Mobile Robot Based on Multi-Sensor Fusion. *Sensors 2024, Vol. 24, Page 4998*, *24*(15), 4998. Doi:10.3390/S24154998

Comelli, R., Pire, T., & Kofman, E. (2019). *Evaluation of Visual SLAM Algorithms on Agricultural Dataset*. In Work-shop on Information Processing and Control (RPIC) (pp.1-6).

Di, W., Ahamed, T. (2024). Design of Navigation System for Transportation Mobile Robot for Agricultural Farms. In: Ahamed, T. (eds) IoT and AI in Agriculture. (pp. 57-84). Singapore, Springer.

Ding, H., Zhang, B., Zhou, J., Yan, Y., Tian, G., & Gu, B. (2022). Recent developments and applications of simultaneous localization and mapping in agriculture. *Journal of Field Robotics*, *39*(6), 956-983. Doi:10.1002/rob.22077

Eceoğlu, O., & Ünal, İ. (2024). Optimizing Orchard Planting Efficiency with a GIS-Integrated Autonomous Soil-Drilling Robot. *AgriEngineering 2024, Vol. 6, Pages 2870-2890*, *6*(3), 2870-2890. Doi:10.3390/AGRIENGINEERING6030166

El-Shirbeny, M. A., & Biradar, C. (2024). Advances in earth observation and artificial intelligence in monitoring vegetation dynamics of dryland agroecosystems. *Vegetation Dynamics and*

Crop Stress: An Earth-Observation Perspective, 1-19. Doi:10.1016/B978-0-323-95616-1.00001-8

Espinel, R., Herrera-Franco, G., Rivadeneira García, J. L., & Escandón-Panchana, P. (2024). Artificial Intelligence in Agricultural Mapping: A Review. *Agriculture 2024, Vol. 14, Page 1071*, *14*(7), 1071. Doi:10.3390/AGRICULTURE14071071

Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Santos, C. H., & Pekkeriet, E. (2020). Agricultural robotics for field operations. *Sensors (Switzerland)*, C. 20, s. 2672. MDPI AG. Doi:10.3390/s20092672

Galati, R., Mantriota, G., & Reina, G. (2022). RoboNav: An Affordable Yet Highly Accurate Navigation System for Autonomous Agricultural Robots. *Robotics 2022, Vol. 11, Page 99*, *11*(5), 99. Doi:10.3390/ROBOTICS11050099

Gao, P., Lee, H., Jeon, C. W., Yun, C., Kim, H. J., Wang, W., … Han, X. (2022). Improved Position Estimation Algorithm of Agricultural Mobile Robots Based on Multisensor Fusion and Autoencoder Neural Network. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 1522*, *22*(4), 1522. Doi:10.3390/S22041522

Guo, J., Li, X., Li, Z., Hu, L., Yang, G., Zhao, C., … Ge, M. (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, *19*(5), 895-911. Doi:10.1007/s11119-018-9563-8

Ji, T., Sivakumar, A. N., Chowdhary, G., & Driggs-Campbell, K. (2022). Proactive Anomaly Detection for Robot Navigation with Multi-Sensor Fusion. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *7*(2), 4975-4982. Doi:10.1109/LRA.2022.3153989

Jiang, S., Wang, S., Yi, Z., Zhang, M., & Lv, X. (2022). Autonomous Navigation System of Greenhouse Mobile Robot Based on 3D Lidar and 2D Lidar SLAM. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 815218. Doi:10.3389/FPLS.2022.815218/BIBTEX

Kumar, A., & Behera, L. (2024). Design, Localization,

Perception, and Control for GPS-Denied Autonomous Aerial Grasping and Harvesting. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *9*(4), 3538-3545. Doi:10.1109/LRA.2024.3366015

Loukatos, D., Templalexis, C., Lentzou, D., Xanthopoulos, G., & Arvanitis, K. G. (2021). Enhancing a flexible robotic spraying platform for distant plant inspection via high-quality thermal imagery data. *Computers and Electronics in Agriculture*, *190*. Doi:10.1016/j.compag.2021.106462

Lv, J., Yao, B., Guo, H., Gao, C., Wu, W., Li, J., … Luo, Q. (2024). MOLO-SLAM: A Semantic SLAM for Accurate Removal of Dynamic Objects in Agricultural Environments. *Agriculture (Switzerland)*, *14*(6). Doi:10.3390/agriculture14060819

Majumdar, P., Bhattacharya, D., Mitra, S. (2023). Utilities of 5G Communication Technologies for Promoting Advancement in Agriculture 4.0: Recent Trends, Research Issues and Review of Literature. In: Bhushan, B., Sharma, S.K., Kumar, R., Priyadarshini, I. (eds) 5G and Beyond. Springer Tracts in Electrical and Electronics Engineering. (pp. 111-125). Singapore: Springer. Doi:10.1007/978-981-99-3668-7_6

Majumder, B. D., Halder, J., Biswas, S., Roy, J. K., & Sinha Roy, T. (2023). Development of Autonomous Robot To Perform Multiple Tasks in Agricultural Fields. *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST*. IEEE Computer Society HYDERABAD, India, 2023, (pp. 1-6). Doi:10.1109/ICST59744.2023.10460798

Mammarella, M., Comba, L., Biglia, A., Dabbene, F., & Gay, P. (2022). Cooperation of unmanned systems for agricultural applications: A theoretical framework. *Biosystems Engineering*, *223*, 61-80. Doi:10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2021.11.008

Messina, G., & Modica, G. (2020). Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote Sensing*, C. 12. MDPI AG. Doi:10.3390/RS12091491

Nehme, H., Aubry, C., Solatges, T., Savatier, X., Rossi, R., & Boutteau, R. (2021). LiDAR-based Structure Tracking for Agricultural Robots: Application to Autonomous Navigation in Vineyards. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, *103*(4). Doi:10.1007/s10846-021-01519-7

Oyebode, O. J., & Afolalu, S. A. (2024). Adoption of Smart Automation Technologies and Computational Intelligence in Mechatronics Systems for Environmental Sustainability. *International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals, SEB4SDG 2024*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Doi:10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629931

Padhiary, M., Saha, D., Kumar, R., Sethi, L. N., & Kumar, A. (2024). Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain vehicle for farm automation. *Smart Agricultural Technology*, *8*, 100483. Doi:10.1016/J.ATECH.2024.100483

Perez-Ruiz, M., Martínez-Guanter, J., & Upadhyaya, S. K. (2021). High-precision GNSS for agricultural operations. *GPS and GNSS Technology in Geosciences*, 299-335. Doi:10.1016/B978-0-12-818617-6.00017-2

Qu, J., Qiu, Z., Li, L., Guo, K., & Li, D. (2024). Map Construction and Positioning Method for LiDAR SLAM-Based Navigation of an Agricultural Field Inspection Robot. *Agronomy*, *14*(10), 2365. Doi:10.3390/agronomy14102365

Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global Navigation Satellite Systems as State-of-the-Art Solutions in Precision Agriculture: A Review of Studies Indexed in the Web of Science. *Agriculture 2023, Vol. 13, Page 1417*, *13*(7), 1417. Doi:10.3390/AGRICULTURE13071417

Shalal, N., Low, T., McCarthy, C. & Hancock, N. (2013). "A review of autonomous navigation systems in agricultural environments." SEAg 2013: Innovative Agricultural Technologies for a Sustainable Future. 22 - 25 Sep 2013. Barton, Australia.

Shamshiri, R., Behjati, R., K. Balasundram, M., Teh Boon Sung, S., A. Hameed, C., Kamil Zolkafli, I., & Ho Kang, Y. (2024). Use Cases of Technologies in Precision Agriculture: Selected Abstracts Submitted to the 10th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture (ACPA10). IntechOpen. Doi: 10.5772/intechopen.115091

Shiran, W. & Ahamed, T. (2024). Navigation System for Autonomous Agricultural Vehicles for Indoor Farms. In: Ahamed, T. (eds) IoT and AI in Agriculture. Springer, Singapore, (pp 123–147).

Shu, F., Lesur, P., Xie, Y., Pagani, A., & Stricker, D. (2021). SLAM in the Field: An evaluation of monocular mapping and localization on challenging dynamic agricultural environment. *Proceedings - 2021 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2021*, 1760-1770. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Doi:10.1109/WACV48630.2021.00180

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. *Cognitive Robotics*, *3*, 54-70. Doi:10.1016/J.COGR.2023.04.001

Tang, Y., Dananjayan, S., Hou, C., Guo, Q., Luo, S., & He, Y. (2021). A survey on the 5G network and its impact on agriculture: Challenges and opportunities. *Computers and Electronics in Agriculture*, C. 180. Elsevier B.V. Doi: 10.1016/j.compag.2020.105895

Tomaszewski, L., & Kołakowski, R. (2023). Mobile Services for Smart Agriculture and Forestry, Biodiversity Monitoring, and Water Management: Challenges for 5G/6G Networks. *Telecom*, *4*(1), 67-99. Doi:10.3390/telecom4010006

Velasquez, A. E. B., Higuti, V. A. H., Guerrero, H. B., Gasparino, M. V., Magalhães, D. V., Aroca, R. V., & Becker, M. (2020). Reactive navigation system based on H∞ control system and LiDAR readings on corn crops. *Precision Agriculture*, *21*(2), 349-

368. Doi:10.1007/s11119-019-09672-8

Wang, Q., Yang, C., Wang, Y., & Wu, S. E. (2020). Application of low cost integrated navigation system in precision agriculture. *Intelligent Automation and Soft Computing*, *26*(6), 1419-1428. Doi:10.32604/iasc.2020.012759

Zhang, Q., Chen, Q., Xu, Z., Zhang, T., & Niu, X. (2021). Evaluating the navigation performance of multi-information integration based on low-end inertial sensors for precision agriculture. *Precision Agriculture*, *22*(3), 627-646. Doi:10.1007/S11119-020-09747-X/TABLES/6

Zhang, Y., Zhang, B., Shen, C., Liu, H., Huang, J., Tian, K., & Tang, Z. (2024). Review of the field environmental sensing methods based on multi-sensor information fusion technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *17*(2), 1-13. Doi:10.25165/IJABE.V17I2.8596

Zhivkov, T., Sklar, E. I., Botting, D, & Pearson, S. (2023). 5G on the Farm: Evaluating Wireless Network Capabilities and Needs for Agricultural Robotics. *Machines*, *11*(12). Doi:10.3390/machines11121064

BÖLÜM V

Use Of Bıocar In Agrıcultural Productıon

Erhan GEZER[1]
Can Burak ŞİŞMAN[2]

1. Introduction

In recent years, the importance of sustainably continuing agriculture has increased. Sustainable agriculture is defined as an approach based on the principle of increasing the quantity and quality of agricultural products and keeping environmental factors, social interactions and economic conditions in balance. (Pezikoğlu, 2012).

The combined application of modern agricultural techniques and commercial fertilizers is widely used to meet the rapid population growth and the resulting increasing need for agricultural products. (Eryılmaz & Kılıç, 2018). This type of production has caused various environmental problems over time. However, ignoring the problems encountered by assuming that existing

[1] 1 Ass. Prof. Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Tekirdağ/Türkiye (Orcid: iD: 0000-0002-1142-5050)
[2] Prof.Dr. Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Tekirdağ/Türkiye (Orcid: iD: 0000-0003-0917-8529)

resources are self- renewing has slowed down the development of people's environmental sensitivity (Dulupçu, 2000).

The most important problems facing today's world include the infertility of land due to intensive production, the misuse of land, erosion and global warming resulting from intense greenhouse gas emissions. (Leblebici & al., 2016). Soil losses experienced in lands cultivated per minute around the world; It occurs due to erosion (5 ha), salt problem (3 ha), loss of soil functions (1 ha) and misuse of land (1 ha) (Abrol & al., 1988).

In light of the predictions made based on the results obtained from academic studies, it is thought that the population density in the world will approximately double in the next 75 years, but the amount of land currently under cultivation will increase only by 10% in this period. In line with these estimates, the importance of using our natural resources in a sustainable way comes to the fore once again (Güçdemir & Sönmez, 2008).

Although commercial fertilizers have a positive and accelerating effect on agricultural production, their use has become unsafe due to their negative effects on environmental factors and human health and researchers have started to search for new ones. For this reason, substances of organic origin that are beneficial for environmental factors and human health, minimize the use of commercial fertilizers and improve soil conditions are being evaluated (Ergün, 2017).

Application of organic substances as fertilizers, the usefulness of these substances in improving soils and increasing their quality offer new options aimed at good environmental management and increasing the quality and quantity of products in agricultural production (Aksoy & al., 2007). Many studies have been carried out to increase product quality by using organic-based materials as fertilizers, and instead of disposing of organic-based waste materials that cause environmental pollution by burning, the most preferred method has been to process these materials with different methods and make them reusable. In this way, both the pressure on the environment caused by organic wastes will be

reduced and the ability of plants to absorb nutrients from the soil will be increased (Ergün, 2017).

Since the quality of the soil of agricultural lands is the main factor, the high amount of organic matter in these soils is important. It has been concluded that biochar, defined as wood charcoal or natural coal, is effective in enriching soils in terms of organic matter and contains a high amount of carbon element (Luo & Guo., 2016).

In this study, the positive effects of biochar, which enables the recycling of organic wastes without creating an environmental problem and their conversion into a valuable material, will be evaluated in the light of literature information.

2. Biochar

The first point that attracted scientists' attention to biochar was that agricultural lands located in regions close to the living areas of Amazon natives have dark soils that are fertile and have high potential in terms of organic matter (Leblebici & al., 2016). It has been determined that the reason why this soil type, called terra preta, is rich in organic matter is because people living in the Amazon region burn woody materials (biochar) and bury them in the soil (Leblebici & al., 2016; Kammann & al., 2017; Albayrak, 2019). The area where the Terra Preta soil type is located is among the areas with the highest productivity and rich biodiversity in the Amazon region (Figure 1). Although it is based on the idea that this situation occurred due to the biochar found in the soil, it is not clear whether the processes of burning biomass and converting it into biochar were done consciously or whether these practices were a waste management method of that period (Glaser & Birk 2012).

Figure 1. Profile view of oxisol soils in terra Preta and its immediate area (Glaser & al., 2001).

The first studies on biochar production in the modern sense were carried out by Japanese producers at the beginning of the last century, together with the compost production technique (Ogawa & Okimori 2010). Biochar, obtained by burning rice hulls or other organic waste in classical furnaces, was used to improve soils and eliminate bad odors in the environment (Nishio 1996).

Materials rich in carbon (C), which are formed as a result of the chemical change of woody or other biomass material with heat in an oxygen-free environment, are referred to as biochar (Günal & Erdem, 2018). It is thought that biochar will make significant contributions to the success of strategies planned for worldwide development in the current century (Qin & al., 2022). Biochar, which is obtained as a result of subjecting waste biomass to the pyrolysis process, is a product with surprising qualities (physical and chemical), which improves environmental factors and can be used in different business areas (Figure 2) (Ruan & al., 2019).

Pyrolysis process is widely used to obtain biochar due to its practicality, high efficiency and low cost (Uday & al., 2022). Pyrolysis is the process in which organic materials used as raw materials, in the absence of oxygen and at relatively high temperatures, decompose in a way that their chemical and physical

states cannot be recycled, depending on heat. As a result of subjecting organic materials to the pyrolysis process, the carbon in the raw material content cannot be removed from the environment in the form of CO_2 and the majority is preserved. Thus, as a result of the pyrolysis process, biochar, bio-oils and combustible synthetic gases (syngas) are formed (Günal & Erdem, 2021). Academic studies conducted in recent years indicate that biochar, which is formed as a result of subjecting organic matter to the pyrolysis process, will provide significant benefits in preventing the decrease of plant nutrients in the soil through leaching, increasing the amount of carbon elements in the soil, positively affecting the fertility of the soil and reducing the amount of greenhouse gases that will be produced as a result of agricultural processes (Ippolito & al., 2012).

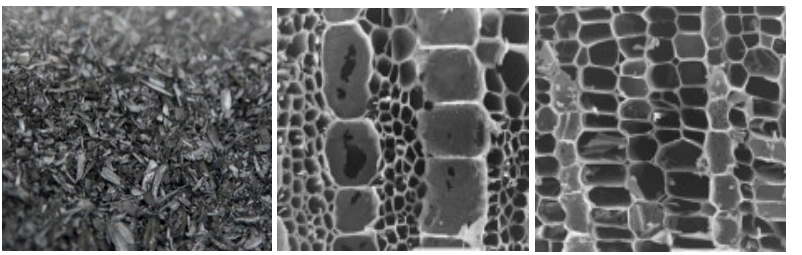


Figure 2. Biochar and its images taken from the electron microscope (Anonymous, 2023).

The decomposition process that occurs as a result of burning biomass by keeping the heating rate high (heat increase of 100 °C or more per minute) is called fast pyrolysis, the process used when liquid and gas are desired to be obtained from biomass (Stoyle, 2011; Brewer, 2012). The decomposition process that occurs as a result of burning biomass at a lower heating rate (temperature increase of 5-10°C per minute) is called slow pyrolysis and this process is preferred when it is desired to obtain more solid matter (biochar) from biomass (Chen & al., 2007; Stoyle, 2011; Brewer, 2012).

The pyrolysis process is named differently as slow, medium, fast pyrolysis and gasification depending on the exposure time of the biochar raw material to temperature, the applied temperature value

and the presence of steam in the installed system during the process. The process in which the time the biochar raw material stays in the installed system and the excess temperature is around 400ºC and the highest carbon content (35%) in biochar is obtained is defined as slow pyrolysis. The process in which 20% biochar is obtained as a result of the application of approximately 500ºC temperature to the biochar raw material for 10-20 hours is expressed as medium pyrolysis. The process in which approximately 500 ºC temperature is applied to the biochar raw material for 1 hour and 12% biochar is obtained is expressed as fast pyrolysis. The process in which approximately 800 ºC temperature is applied to the biochar raw material for a long time and 10% biochar is obtained is expressed as gasification (Lehman & Joseph, 2009; Verheijen & al., 2010).

The characteristics of the product obtained in the biochar production process vary depending on the applied temperature values (Winsley, 2007). Biomass is mostly composed of three organic compounds, cellulose, hemicellulose and lignin. These behave differently during heat treatment and therefore the composition of the biomass directly affects the product yield and properties. Hemicellulose is the most reactive of the three main components and decomposes at temperatures of approximately 220-315 °C. Cellulose has a branched structure and reacts more regularly to heat and decomposes at temperatures between 280 and 400 °C. Since lignin has a different chemical structure, decomposition starts at 200 °C instead of constant temperature values and the raw material may need to rise to 900 °C for the process to be completed (Yang & al., 2007; Quicker & al., 2016). The product obtained as a result of the combustion process is rich in carbon and has a coal-like appearance because it occurs in an oxygen-free environment and the carbon element cannot escape from the environment. Biochar has a high-water retention capacity due to its porous and granular structure, and thanks to its porous structure, it can be used in very small sizes by grinding (Weber & Quicker, 2018).

The term biochar is a new term that describes the properties that emerge to convey soil management and carbon (C) enrichment (Lehman & al., 2006). Thanks to its large surface area and porous

structure, its ability to retain plant nutrients, different organic pollutants and gases are among the useful qualities of biochar. Different processes and production materials applied in biochar production affect the chemical and physical structure of the obtained biochar (Yargicoglu & al., 2015).

Suitability of biochar used for improving soil conditions, the properties of the raw material used in the production of biochar, the characteristics of the land soil where biochar is applied and depends on the type of plants produced on the land (Prapagdee & Tawinteung, 2017).

3. Areas of Use of Biochar

3.1. Use to Improve Soil Conditions

The amount of organic matter in soils is an important parameter for the productivity of agricultural lands and for obtaining high yields from products. Therefore, the application of animal manure with high organic matter content to agricultural lands is an effective method for increasing the productivity rates of soils. However, it brings with it environmental problems such as rising nitrogen oxide (N_2O) emissions and unusable plant nutrients polluting water resources (Risse & al., 2006). Although there are many stages in the use of biochar in the maturation processes of fertilizers, it is a high potential resource since laying the fertilizer on agricultural lands is the final goal. In addition, the fact that biochar is used in different environments within the shelter means that biochar will eventually be used on agricultural lands (Sohi & al., 2010).

Although the technologies used in biochar production are partly modern, the formation of biochar under natural conditions takes place over a long process that takes centuries. Organic-based wastes are buried in the soil during natural processes, and as a result of the burning of grasses on the soil by natural fires, they become charred, allowing the formation of biochar (Akgül, 2017).

Biochar is effective in determining the acidity or alkalinity properties in the soil due to its high oxygen content. In addition, it

has important contributions to the creation of a suitable nutrient environment for plants by ensuring that plant nutrients are easily taken from the soil (Glaser & al., 2014).

Biochar provides increased productivity by retaining some plant nutrients (Ca, Mg and K, etc.) in the soil. Since biochar generally has a basic character, when added to acidic soils, it helps regulate the pH value of the soil by increasing the pH value (Ippolito & al., 2016).

3.2. Use in Animal Husbandry

The addition of biochar to animal feed is not a new practice. Due to its properties, it is accepted that it reduces the amount of nitrogen and disease agents in animal feces, as well as contributing to the increase of animals' resistance to diseases (Kalus & al., 2020).

Biochar, which enters the digestive systems of animals along with the feed, increases the access to the carbon element in the digestive system and, as a result, causes complex results in terms of the activities of microorganisms and gas formation. The biochar used increases the amount of oxygen and ventilation, slowing down enteric fermentation (methanogenesis). In addition, it is accepted that biochar, which has a large surface area, a porous structure and high ion exchange capacity, prevents methane release resulting from rumination by providing suitable conditions for biofilm formation (Leng, 2014)

The storage and purification of animal manure is a very important stage that must be implemented in order to reduce the harmful reactions on the qualities of soil, air and water, and to use the organic matter and plant nutrients contained in animal manure in a beneficial way. For this reason, while manure is kept in manure storage areas without being thrown onto agricultural lands, lagoon-style structures that provide an oxygen-free environment and systems that transform manure into compost ensure the purification process (Huggins, 2016). The decomposition process, which takes place in an oxygen-free environment, provides both a valuable waste management process in terms of disposal of manure and energy

production from manure. The addition of biochar during these processes reduces the amount of odor and gas emissions (Graves & al., 2022).

3.3. Use in gas retention

The temperature increase on Earth continues to increase due to the increase in the amount of greenhouse gas emissions (CO_2, CH_4 and N_2O) caused by various reasons (Liu & al., 2019). Biochar, which has large surface areas and a tendency to react with non-polar materials, retains CO_2 and enables it to be stored within itself thanks to its porous structure (Wei & al., 2012).

Although it varies according to the type of raw material used and the conditions under which biochar is obtained, biochar has the potential to reduce greenhouse gas emissions by approximately 870 kg CO_2 equivalent per ton of dry raw material. 62-66% of this value is realized by the retention and storage of carbon element in the organic matter-rich biomass contained in biochar (Roberts & al., 2009). In the study evaluating the effects of biochar on N_2O emissions caused by slurry, organic and commercial fertilizers, it was determined that N_2O emissions detected from biochar-applied samples were significantly lower than the emissions detected from control samples. This situation is thought to be due to the high absorbent property of biochar (Angst & al., 2013).

Since a wide range of plant waste can be used in the production of biochar, which is a natural absorbent obtained from biomass, its cost is almost one tenth compared to the different CO_2 absorbents currently used (Chatterjee, 2018). One of the most preferred methods for reducing greenhouse gas emissions is the technology combinations that capture large amounts of carbon dioxide gas and store it in suitable areas (carbon sequestration) (Creamer & al., 2014). The ability to capture CO_2 gas varies depending on the physical and chemical properties of biochar, the type of raw material used, and pyrolysis conditions. For this reason, the reductions in carbon sequestration rates and greenhouse gas emission amounts also vary. The ability to capture CO_2 gas for biochar is the weight of CO_2 gas captured by biochar per unit weight.

It is also stated that methane and nitrogen oxide gas emissions from agricultural areas are significantly reduced as a result of biochar application (Chiang & Juang, 2017; Gupta & al., 2020).

3.4. Use in the Construction Industry

Aggregate used in concrete production is a component that does not lose its importance for concrete in the following years, starting from the production of concrete. Concrete aggregate is the most used material in proportion to the content of concrete material, and in recent years, there have been decreases in its natural resources, and there are problems in the supply of qualified materials that comply with concrete production standards (Anonymous, 2024).

Various materials in the waste position have the potential to be used instead of artificial or natural aggregate materials in concrete production. Due to its advantages such as high carbon capture, low thermal conductivity, chemical stability and low flammability, biochar attracts the attention of scientists and is considered to be a good alternative that can be used instead of aggregate and cement in the production of building materials in the construction sector. In addition, the addition of biochar to concrete accelerates the hydration process, reduces the shrinkage cracks of the mortar and the amount of micro (capillary) absorption in the mortar paste. 5-7% of carbon dioxide emissions worldwide occur in the production and processing stages of cement materials used in the construction sector (Torgal & al., 2012; Andrew, 2018; Maljaee & al., 2021). It is thought that structures containing biochar have a significant potential in reducing the amount of greenhouse gas emissions (Legan & al., 2022).

Due to its relatively low thermal conductivity, biochar used in the production of building elements has positive effects on the insulation properties of the concrete by increasing its porosity (meso, micro and nano pores) (Berardi & Naldi, 2017). The porous structure of biochar has the ability to prevent thermal bridges within cement-added composite materials. Thanks to this feature, it allows the reduction of thermal conductivity and the more successful insulation properties of the structures (Gupta & Kua, 2017).

The flammability properties of materials used in the construction sector are a parameter that affects the safety of structures against fires. During the pyrolysis process, it has been determined that the flammability of the biochar obtained as a result of applying heat treatment to biomass for a short time and at high heating rates increases, while the flammability decreases when heat treatment is applied at a low heating rate (Zhao & al., 2014). It has been determined that when the cementitious composite material to which biochar is added is exposed to high temperatures, biochar increases its resistance against fire hazard (Gupta & Kua, 2019).

3.5. Use as Absorbent

Biochars are used in the purification of heavy metals in wastewater, especially because they are low-cost absorbents. Scientific studies have shown that biochars are successfully used in removing heavy metals from aqueous environments and are even more successful absorbents than activated carbons under different conditions. Although there are various factors affecting the absorbent properties of biochar, the most important factor can be said to be the type of biomass raw material (Inyang & al., 2016).

While biochars can be applied to purify pollutants from water, biochar also has the opportunity to be used as fertilizer by storing plant nutrients as a result of its adsorption properties (Bernd & al., 2013).

4. Conclusion

According to the results obtained from studies conducted worldwide and in Turkey, biochar is a remarkable material that can be used in the sustainable disposal of organic waste due to its positive effects such as improving soil conditions, absorbing and storing plant nutrients, reducing greenhouse gas emissions in agricultural production and the construction sector, improving the properties of concrete by adding it to concrete mixtures, and providing economic contribution by allowing the reuse of waste materials. Despite the large amount of organic waste and high biochar production potential in our country and the many

advantageous properties of biochar, the relevant sectors do not have sufficient information about this material.

5. Resources

Abrol, I., Yadav, J., And Massoud, F. (1988). Salt-Affected Soils and Their Management. Rome: Fao Soils Bulletin, 39.

Akgül, G., 2017. Biyokömür: Üretimi ve Kullanım Alanları. S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.5, s.4, ss. 485-499.

Albayrak, E., 2019. Farklı Tekstürlere Sahip Topraklarda Biyokömürün Buğday (Trıtıcum Aestıvum L.) Bitkisinin Rizosfer Bölgesindeki Mikrobiyal Aktiviteye Olan Etkisi. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Angst, T.E., Patterson, C.J., Reay, D.S., Anderson, P., Peshkur, T.A., Sohi, S.P., 2013. Biochar Diminishes Nitrous Oxide and Nitrate Leaching from Diverse Nutrient Sources. J. Environ. Qual. 42, 672e682.

Anonymous, 2023. Biochar in Sustainable Soil Management: Potential and Constraints. Intergovernmental Technical Panel on Soils. Food and Agriculture Organization of The United Nations.

Anonymous, 2024. Agrega. http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/agrega/ (erişim tarihi 10.08.2024)

Berardi, U. and Naldi, M., 2017. The İmpact of The Temperature Dependent Thermal Conductivity of İnsulating Materials on The Effective Building Envelope Performance, Energy Build. 144, 262–275, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.052.

Bernd, M., Steffen, W., Karsten, A., Lübken, M., 2013. EGU General Assembly, Potential Dual Use of Biochar for Wastewater Treatment and Soil Amelioration. Geophys. Res. Abstr. 15 (EGU2013-11260).

Brewer, C.E. 2012. Biochar characterization and engineering. Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University, 182p.

Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S. 2007. Agronomic Values of Greenwaste Biochar as A Soil Amendment. Australian Journal of Soil Research, 45(8): 629-634.

Chatterjee R, Sajjadi B, Mattern DL, Chen WY, Zubatiuk T, Leszczynska D, et al., 2018. Ultrasound Cavitation İntensified Amine Functionalization: A Feasible Strategy for Enhancing CO2 Capture Capacity of Biochar. Fuel 225: 287–98. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.145.

Chiang Y, Juang R., 2017. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Surface Modifications of Carbonaceous Materials for Carbon Dioxide Adsorption : A Review. J Taiwan Inst Chem Eng 71:214–34. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.014.

Creamer, A.E.; Gao, B.; Zhang, M., 2014. Carbon Dioxide Capture Using Biochar Produced from Sugarcane Bagasse and Hickory Wood. Chem. Eng. J., 249, 174–179.

Dulupçu M 2000. Sürdürülebilir Kalkınma Politikasına Yönelik Gelişmeler. Dış Ticaret Dergisi, 20: 46-70.

Ergün, Y.A., 2017. Biyokömür ve Ahır Gübresi Uygulamalarının Topraktaki Bazı Enzim Aktivitelerine, CO_2 Üretimine, Besin Elementi İçeriğine ve Domates Bitkisinin Gelişimine Etkisi. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Eryılmaz, G.A. ve Kılıç, O., 2018. Türkiye'de Sürdürülebilir Tarım ve İyi Tarım Uygulamaları. KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi, 21(4):624-631, DOI:10.18016/ ksudobil. 345137.

Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. and Zech, W., 2001. The 'Terra Preta' Phenomenon: a Model for Sustainable Agriculture in The Humid Tropics. Natural Sciences (2001) 88:37–41. DOI 10.1007/s001140000193.

Glaser, B., & Birk, J. J., 2012. State of The Scientific Knowledge on Properties and Genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). Geochimica et Cosmochimica Acta, 82, 39–51.

Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., 2014, "Biochar Organic Fertilizers from Natural Resources as Substitute for Mineral Fertilizers", Agron. Sustain. Dev. Vol. 35, pp. 667–678.

Graves, C., Kolar P., Shah S., Grimes J. and Sharara M., 2022. Can Biochar Improve the Sustainability of Animal Production? Appl. Sci. 12, 5042. https://doi.org/10.3390/app12105042.

Gupta, D.K., Gupta, C.K., Dubey, R., Fagodiya, R.K., Sharma, G., Keerthika A., Noor Mohamed, M. B., Dev R. and Shukla A. K., 2020. Role of Biochar in Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Mitigation. Biochar Applications in Agriculture and Environment Management, Chapter. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-40997-5_7.

Gupta, S., Kua, H.W., 2017. Factors Determining the Potential of Biochar As A Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical review, J. Mater. Civ. Eng. 29, 04017086, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001924.

Gupta, S., Kua, H.W., 2019. Combination of Biochar and Silica Fume as Partial Cement Replacement in Mortar: Performance

Evaluation Under Normal and Elevated Temperature, Waste Biomass Valorization, https://doi.org/10.1007/s12649-018-00573-x.

Günal, E. ve Erdem, H., 2018. Biyokömür; Tanımı, Kullanımı ve Tarım Topraklarındaki Etkileri. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi. ;15(2):87-93 DOİ: 10.25308/aduziraat.405858.

Günal, E., ve Erdem, H., 2021. Sürdürülebilir Çevre Yönetiminde Biyoçar. Sürdürülebilir Çevre Dergisi. Derleme Makalesi Cilt 1 (1), sh. 7-17. https://dergipark.org.tr/tr/pub/cevder.

Huggins, T.M.; Haeger, A.; Biffinger, J.C.; Ren, Z.J, 2016. Granular Biochar Compared with Activated Carbon for Wastewater Treatment and Resource Recovery. Water Res. 94, 225–232.

Inyang, M.I., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A., Mosa, A. ve Cao, X., 2016. A Review of Biochar as A Low-Cost Adsorbent for Aqueous Heavy Metal Removal, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 46, 406–433.

Ippolito JA,, Laird DA,, Busscher WJ, (2012). Environmental Benefits of Biochar, J. of Environ. Qual., 41 (4), 967-972

Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Lentz, R. D., 2016, "Designer, Acidic Biochar İnfluences Calcareous Soil Characteristics", Chemosphere, Vol. 142, pp.184–191.

Kalus, K.; Konkol, D.; Korczy´ nski, M.; Koziel, J.A.; Opali´ nski, S., 2020. Laying Hens Biochar Diet Supplementation—Effect on Performance, Excreta N Content, NH_3 and VOCs Emissions, Egg Traits and Egg Consumers Acceptance. Collect. FAO Agric. 10, 237.

Kammann C, Ippolito J, Hagemann N, Borchard N, Cayuela ML, Estavillo JM, ... & Rasse D., 2017. Biochar as A Tool to Reduce the Agricultural Greenhouse-Gas Burden–Knowns, Unknowns and Future Research Needs. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 25(2), 114-139.

Leblebici, S., Kutlu, T. ve Şenal, D., 2016. Tarım Uygulamalarında Yeni Bir Yaklaşım: Biyokömür. Bilinçli Sağlıklı Yaşam Dergisi, Sayı:12, Sayfa:148-153.

Legan, M., Gotvajn, A. Z., Zupan, K., 2022. Potential of Biochar Use in Building Materials. Journal of Environmental Management 309, 114704.

Lehmann J., Gaunt J., Rondon M., (2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems—A Review, Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change, 11, 403–427.

Lehmann J., Joseph S., (2009). Biochar for Environmental Management: An Introduction, Lehmann J, Joseph, S. (Eds.). Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, pp. 1-12.

Leng, R.A. Interactions between Microbial Consortia in Biofilms: A Paradigm Shift in Rumen Microbial Ecology and Enteric Methane Mitigation. Anim. Prod. Sci. 2014, 54, 519–543.

Liu, C.Y., Yao, Z.S., Wang, K., Zheng, X.H., Li, B.G., 2019. Net Ecosystem Carbon and Greenhouse Gas Budgets in Fiber and Cereal Cropping Systems, Sci. Total Environ. 647, 895–904.

Luo, L., & Gu, J. D (2016). Alteration of Extracellular Enzyme Activity and Microbial Abundance by Biochar Addition: Implication

for Carbon Sequestration in Subtropical Mangrove Sediment. Journal of Environmental Management 182: 29-36.

Maljaee,H., Madadi R., Paiva, H., Tarelho, L. and Ferreira, V.M., 2021. Incorporation of Biochar in Cementitious Materials: A Roadmap of Biochar Selection. Construction and Building Materials, 283, 122757.

Nishio, M., 1996. Microbial Fertilizers in Japan. Kannondai 3-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan.

Ogawa, M., & Okimori, Y., 2010. Pioneering Works in Biochar Research, Japan. Australian Journal of Soil Research, 48, 489.

Pezikoğlu, F. (2012). Sürdürülebilir Tarım ve Kırsal Kalkınma Kavramı İçinde Tarım-Turizm-Kırsal Alan İlişkisi ve Sonuçları. KMÜ Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi, 14(22), 83-92.

Prapagdee S, Tawinteung N., 2017. Effects of Biochar on Enhanced Nutrient Use Efficiency of Green Bean, Vigna Radiata L. Environmental Science and Pollution Research 24(10): 9460-9467.

Qin F, Li J, Zhang C et al (2022) Biochar in the 21st century: A Data-Driven Visualization of Collaboration, Frontier İdentification, and Future Trend. Sci Total Environ 818:151774. https:// doi. org/ 10. 1016/j. scito tenv. 2021. 151774.

Quicker P, Biokohle Weber K. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03689-8.

Risse, L.M.; Cabrera, M.L.; Franzluebbers, A.J.; Gaskin, J.W.; Gilley, J.E.; Killorn, R.; Radcliffe, D.E.; Tollner, W.E.; Zhang, H,.

2006. Land Application of Manure for Beneficial Reuse. In Animal Agriculture and the Environment: National Center for Manure and Animal Waste Management White Papers; Rice, J.M., Caldwell, D.F., Humenik, F.J., Eds.; ASABE: St. Joseph, MI, USA.

Roberts, K.G., Gloy, B.A., Joseph, S., Scott, N.R. and Lehmann, J., 2009. Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential, Environ. Sci. Technol. 44 (2), 827e833.

Ruan, X., Sun, Y., Du, W., Tang, Y., Liu, Q., Zhang, Z., Doherty, W., Frost, R. L., Qian, G., & Tsang, D. C. W. (2019). Formation, Characteristics, and Applications of Environmentally Persistent Free Radicals in Biochar: A Review. In Bioresource Technology (Vol. 281, pp. 457–468). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.105.

Sohi, S.P.; Krull, E.; Lopez-Capel, E.; Bol, R., 2010. Chapter 2—A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. Adv. Agron. 105, 47–82.

Stoyle, A. 2011. Biochar Production For Carbon Sequestration. A Major Qualifying Project Submitted to the faculty of Worcester Polytechnic Institute In partial fulfillment of the requirements for the Degree of Bachelor of Science in Chemical Engineering Worcester Polytechnic Institute.

Torgal, F.P., Miraldo, S., Labrincha, J.A., De Brito, J., 2012. An overview on Concrete Carbonation in The Context of Eco-Efficient Construction: Evaluation, Use of SCMs and/or RAC, Constr. Build. Mater. 36, 141–150.

Uday V, Harikrishnan PS, Deoli K et al (2022) Current trends in production, morphology, and real-world environmental applications of biochar for the promotion of sustainability. Bioresour Technol 359:127467. https://doi. org/ 10. 1016/j. biort ech. 2022. 127467.

Verheijen F., Jeffery S., Bastos AC., Van der Velde M., Diafas I., (2010). Biochar Application to Soils. A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes, and Functions, European Commission, Joint Research Centre, 24099, 162.

Weber, K. and Quicker, P., 2018. Properties of Biochar, Fuel 217 240–261, https://doi. org/10.1016/j.fuel.2017.12.054.

Wei, H., Deng, S., Hu, B., Chen, Z., Wang, B., Huang, J., et al., 2012. Granular Bambooderived Activated Carbon for High CO_2 Adsorption: the Dominant Role of Narrow Micropores, ChemSusChem. 5 (12) 2354-2360.

Winsley P., 2007. Biochar and Bioenergy Production for Climate Change, New Zealand Science Review, 64 (1), 1-10.

Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. Fuel 2007; 86: 1781–8. http://dx.doi.org/10.1016/j.

Yargicoglu, E.N., Sadasivam, B.Y. K.R. Reddy, K. Spokas, 2015. Physical and Chemical Characterization of Waste Wood Derived Biochars, Waste Manag. 36, 256–268.

Zhao, M.Y., Enders, A., Lehmann, J., 2014. Short- and Long-Term Flammability of Biochars, Biomass Bioenergy 69 (2014) 183–191, https://doi.org/10.1016/j.biombioe.

BÖLÜM VI

Hassas Tarımda Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları

Osman ECEOĞLU [1]
İlker ÜNAL[2]

1. Giriş

Hassas tarım, tarımsal üretimin verimliliğini artırmayı, kaynak kullanımını optimize etmeyi ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamayı amaçlayan modern bir tarım yönetimi anlayışıdır. Günümüzde bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, hassas tarım uygulamaları hızlı bir dönüşüm geçirmektedir. Uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi dijital araçlar, tarımda veri odaklı karar alma süreçlerini destekleyen temel teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle, bitki sağlığı, toprak nemi ve diğer tarımsal faktörlerin hassas bir şekilde izlenmesini sağlayan bu teknolojiler, tarımın geleceğine yön vermektedir (Aljanabi, Dedeoğlu & Şeker, 2024).

[1]Öğr. Gör. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya/Türkiye, Orcid: 0000-0001-5778-6655, osmaneceoglu@akdeniz.edu.tr
[2]Doç. Dr., Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Burdur/Türkiye, ORCID: 0000-0002-5188-4438, iunal@mehmetakif.edu.tr

Uzaktan algılama teknolojileri, tarımsal alanların üstten görüntülenmesi ve analiz edilmesi yoluyla bitki sağlığı ve toprak durumu gibi kritik bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Aljanabi ve arkadaşları (2024), uzaktan algılama ve makine öğrenimi algoritmalarının birlikte kullanımının çevresel izleme ve arazi yönetiminde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir. Bu tür gelişmiş teknolojilerle tarımsal verilerin doğru ve hızlı bir şekilde analiz edilmesi, çiftçilere gerçek zamanlı bilgi sağlamakta ve daha bilinçli tarım uygulamalarına imkan tanımaktadır (K S & ark., 2024).

CBS ise, bu verileri mekansal düzeyde organize ederek farklı bölgelere özgü tarımsal uygulamaların geliştirilmesini sağlamaktadır. K S ve arkadaşlarının (2024) araştırmasına göre, CBS'nin IoT (Nesnelerin İnterneti) gibi yeni nesil teknolojilerle entegrasyonu, hassas tarımda devrim niteliğinde bir ilerleme sunmakta, çiftçilerin gerçek zamanlı veri kullanarak daha etkin bir kaynak yönetimi sağlamalarına olanak tanımaktadır .

Hassas tarımda uzaktan algılama ve CBS teknolojilerinin birlikte kullanımı, tarımsal yönetimde önemli bir dönüşüm sağlamaktadır. Sishodia ve arkadaşları (2020), GPS ve sensör tabanlı CBS uygulamalarının tarımsal süreçlerin otomasyonunda ve kaynak kullanımının optimize edilmesinde önemli bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Bu teknolojiler, özellikle gübreleme ve sulama işlemlerinde verimliliği artırarak sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemektedir.

2. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları

2.1. Uzaktan Algılamanın Hassas Tarımdaki Rolü

Uzaktan algılama, tarımsal üretimde kritik öneme sahip bir teknoloji olarak, bitki sağlığı, toprak durumu ve çevresel koşulları değerlendirmek için kullanılan verilerin hızlı ve doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji, uydu görüntüleri, insansız hava araçları (İHA) ve hiperspektral sensörler gibi araçlarla desteklenmektedir. Hassas tarım

kapsamında, uzaktan algılama aşağıdaki uygulama alanlarında öne çıkmaktadır:

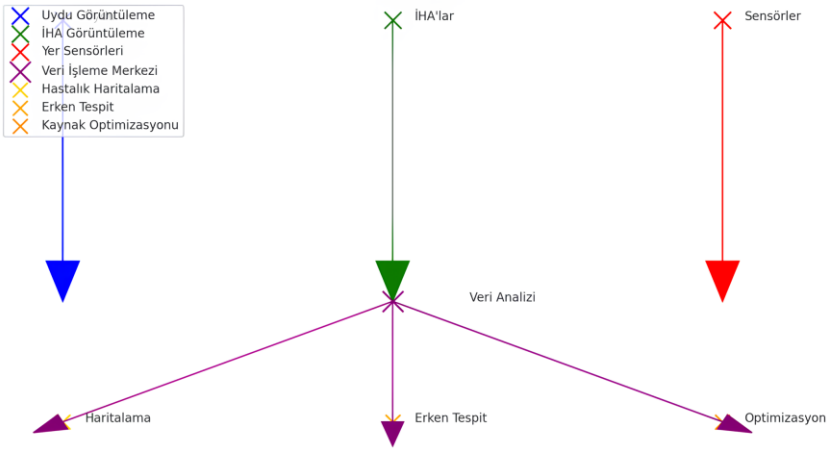
2.1.1. Bitki Sağlığı ve Hastalık Yönetimi

Uzaktan algılama teknolojilerinin, tarımsal üretimde bitki sağlığı ve hastalık yönetimi bağlamında önemli bir işlev gördüğü tespit edilmiştir. Bu teknoloji, bitkilerin fizyolojik stres durumlarını ve hastalık belirtilerini erken evrede tespit ederek, tarımsal müdahalelerin zamanında ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Literatürde, multispektral ve hiperspektral görüntüleme sistemlerinin, bitki yapraklarının klorofil içeriği ve fotosentetik aktivite gibi biyofiziksel özelliklerini analiz ederek, hastalıkların teşhisinde kritik bir rol oynadığı belirtilmiştir (Kouadio & ark., 2023).

Multispektral görüntüleme, görünür ve kızılötesi spektrumda veri toplayarak bitkilerin yapısal özelliklerindeki değişiklikleri belirlerken; hiperspektral görüntüleme, daha geniş bir spektral çözünürlükle hastalık belirtilerinin ayrıntılı analizini mümkün kılmaktadır. Bu tekniklerin özellikle bitki yapraklarındaki renk değişikliklerini, klorofil azalmasını ve su kaybını tespit etmede etkin bir şekilde kullanıldığı ifade edilmiştir. Örneğin, fungal enfeksiyonların ve su stresine bağlı fizyolojik değişimlerin bu yöntemler yardımıyla erken dönemde saptanabildiği bildirilmiştir (Zambrano & ark., 2023).

İlgili çalışmalarda, İHA ve uydu tabanlı görüntüleme sistemlerinin, uzaktan algılama süreçlerinde kilit bir role sahip olduğu vurgulanmıştır. İHA'ların düşük irtifadan yüksek çözünürlüklü görüntüler sağlayarak, küçük ölçekli tarım arazilerinde dahi etkili bir izleme sağladığı bulunmuştur. Uydu tabanlı sistemlerin ise geniş alanların izlenmesine imkan tanıyarak, bölgesel ve ulusal düzeyde tarımsal analizlerde kullanıldığı belirtilmiştir. Bu bağlamda, özellikle mısır, buğday ve üzüm bağları gibi tarımsal ürünlerin hastalık izlemelerinde bu sistemlerin etkili olduğu ifade edilmiştir (Alexopoulos & ark., 2023).

Şekil 1'de uzaktan algılama teknolojileri ile bitki sağlığı ve hastalık yönetimi süreci görülmektedir.



Şekil 7: Uzaktan algılama ile bitki sağlığı izleme süreci

Uzaktan algılama teknolojilerinin, gelecekte yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmaları ile birleştirilerek hastalık teşhis süreçlerini otomatik hale getirebileceği düşünülmektedir. Bu teknolojilerin, yalnızca mevcut durumların analiz edilmesine olanak tanımakla kalmayıp, aynı zamanda hastalık yayılımını tahmin eden modeller geliştirilmesini de sağlayabileceği öngörülmektedir. Böyle bir gelişme, tarımsal süreçlerin daha öngörülebilir ve yönetilebilir hale gelmesine katkıda bulunacak ve çiftçilere zaman ile maliyet açısından önemli tasarruflar sağlayacaktır. Bu tür yenilikler, hassas tarımın etkinliğini artırarak, sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine ulaşılmasını destekleyecektir.

2.1.2. Toprak Nem İzleme

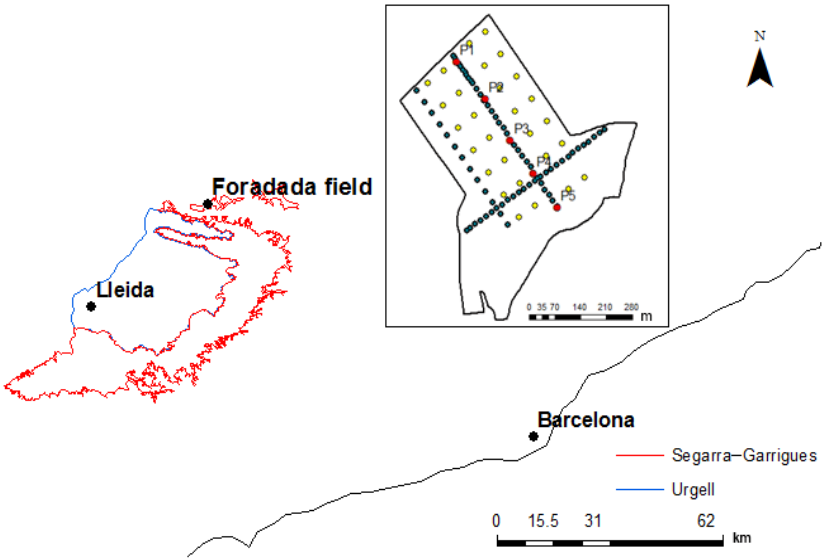
Toprak neminin hassas bir şekilde izlenmesi, tarımsal üretimde su kaynaklarının verimli kullanımı ve bitki sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Hassas sulama sistemlerinin temelini oluşturan bu uygulama, bitkilerin su stresine karşı korunmasını sağlamanın yanı sıra, gereksiz su tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı

sunmaktadır. Uzaktan algılama teknolojileri, toprak neminin uzaktan ve geniş ölçeklerde değerlendirilmesine olanak tanımakta ve tarım alanlarında su kullanımını optimize etmeye yönelik çözümler sunmaktadır (Bouskour, Bahatti & Zaggaf, 2023).

Toprak nem seviyelerinin analizinde kullanılan Normalleştirilmiş Fark Vejetasyon İndeksi (NDVI) gibi spektral indeksler, özellikle bitki örtüsünün yoğunluğu ve sağlığı ile doğrudan ilişkili olan su içeriğinin tespitinde etkili araçlar olarak öne çıkmaktadır. NDVI, bitki örtüsünün kızılötesi ve kırmızı ışığı yansıtma oranlarını kullanarak toprak nem durumu hakkında dolaylı veri sağlamaktadır. Bunun yanında, Su Stresi İndeksi (CWSI) ve Toprak Ayarlı Vejetasyon İndeksi (SAVI) gibi diğer spektral indeksler de farklı tarımsal uygulamalarda toprak nemini izlemek için etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Zambrano & ark., 2023).

İHA ve uydu tabanlı görüntüleme teknolojilerinin toprak nemi izleme çalışmalarında sunduğu avantajlar dikkat çekmektedir. İHA'lar, düşük irtifadan topladıkları yüksek çözünürlüklü verilerle küçük ölçekli alanlarda detaylı değerlendirme yapılmasına olanak tanırken, uydu sistemleri geniş bölgelere yönelik uzun vadeli gözlemler için idealdir. Bu sistemler, özellikle su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve kuraklık riskinin değerlendirilmesi gibi konularda kritik bir destek sağlamaktadır (Alexopoulos & ark., 2023).

Şekil 2'de Segarra-Garriga sulama sistemi içerisindeki Foradada saha alanının konumu ve toprak nemi ölçüm noktalarının dağılımı görülmektedir. Gravimetrik ölçüm noktaları yeşil renkli kesit noktaları olarak düzenlenmiş olup destek noktaları sarı renk ile gösterilmiştir. EC-5 sensörlerinin konumları ise kırmızı ile temsil edilmiştir.



Şekil 8: Segarra-Garriga sulama sistemi içerisindeki Foradada saha alanının konumu ve toprak nemi ölçüm noktalarının dağılımı (Fontanet, Fernàndez-Garcia & Ferrer, 2018).

Gelecekte, toprak nem izleme süreçlerinin daha da geliştirilerek makine öğrenimi ve yapay zeka tabanlı modellerle desteklenebileceği öngörülmektedir. Bu teknolojilerin, tarım alanlarında elde edilen büyük verileri işleyerek bölgeye özgü sulama planları oluşturulmasını ve optimum su kullanımını sağlamayı mümkün kılacağı düşünülmektedir. Böylelikle, sadece su kaynaklarının verimli yönetimi değil, aynı zamanda bitki sağlığının sürekliliği de daha etkin bir şekilde sağlanabilecektir.

Bu tür yenilikler, tarımsal üretimin hem ekonomik verimliliğini artıracak hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılar sunacaktır.

2.1.3. Verim Tahmini ve Kaynak Planlama

Uzaktan algılama teknolojilerinin mahsul büyümesini analiz ederek ürün verimini tahmin etme kapasitesi, tarımsal üretimde kritik bir yere sahiptir. Bu tür tahminler, özellikle ürün

rotasyonu planlama, kaynak optimizasyonu ve iklim değişikliğine uyum süreçlerinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. NDVI ve benzeri spektral indeksler, mahsul büyümesini izleme ve verim tahmini için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasındadır (Huang & Han, 2014).

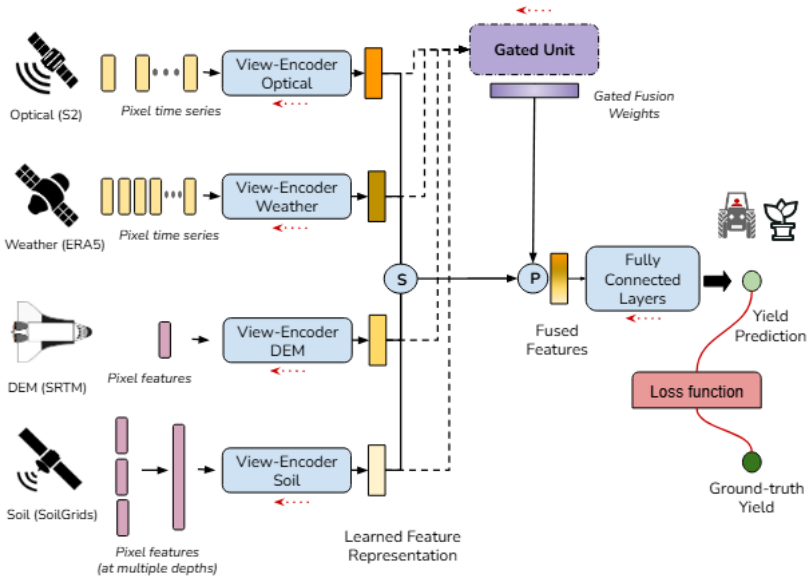
Araştırmalar, uzaktan algılama verilerinin yapay zekâ ve derin öğrenme teknikleri ile entegre edilerek mahsul verimi tahmininde doğruluğun artırıldığını ortaya koymuştur. Özellikle Convolutional Neural Networks (CNN) ve Long Short-Term Memory (LSTM) gibi algoritmaların, karmaşık tarımsal verilerle ilişkilendirildiğinde yüksek başarı sağladığı bildirilmiştir (Muruganantham & ark., 2022). Bunun yanı sıra, yapay zekâ algoritmaları sayesinde sadece verim tahmini değil, aynı zamanda verim üzerindeki çevresel ve iklimsel faktörlerin etkisi de değerlendirilebilmektedir (Joshi & ark., 2023).

Uydu tabanlı uzaktan algılama sistemlerinin, geniş coğrafi bölgelerdeki mahsul verimliliğini izlemek ve tahmin etmek için önemli bir avantaj sağladığı belirtilmiştir. Özellikle, MODIS ve Landsat gibi uydu sistemleri, düşük maliyetle düzenli veri sağlayarak tarımsal yönetim süreçlerini desteklemektedir (Dlamini & ark., 2023). Buna ek olarak, İHA'larda küçük ve orta ölçekli tarım alanlarında detaylı analizler yapmak için etkili bir araç olarak kullanılmaktadır (Zambrano & ark., 2023).

Bir meta-analiz çalışmasında, mahsul verim tahminlerinde NDVI'ın mahsul türüne bağlı olarak farklı başarı oranları gösterdiği belirtilmiştir. Örneğin, pamuk mahsulünde NDVI kullanılarak %88 oranında bir korelasyon bulunmuşken, şeker kamışında bu oran %79 olarak kaydedilmiştir (Huang & Han, 2014).

Şekil 3'te Çoklu Görünüm Kapılı Füzyon (MVGF) modelinin dört görünümle birlikte çizimi görülmektedir. "S" vektör istifleme işlemini, "P" ise nokta çarpımını temsil etmektedir. Siyah ok, ileri geçişi (forward pass) gösterirken, kesikli ok GU (Gated Unit) için ek bağlantıları göstermektedir. Model, tahminin gerçek değerle (ground truth)

karşılaştırılmasıyla uçtan uca öğrenilmektedir. Kırmızı kesikli oklar, kayıp fonksiyonunun model bileşenleri üzerinden geri yayılımını (backward pass) göstermektedir.



Şekil 9: Çoklu Görünüm Kapılı Füzyon (MVGF) modelinin dört görünümle birlikte çizimi (Mena & ark., 2024)

Gelecekte, uzaktan algılama teknolojilerinin yüksek çözünürlüklü sensörler ve büyük veri analitik yöntemleri ile daha da geliştirileceği düşünülmektedir. Bu tür teknolojilerin yalnızca mahsul verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda tarımsal kaynakların daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Özellikle, veri odaklı karar destek sistemlerinin bu gelişmelerle güçleneceği ve tarımsal süreçlerin daha etkin bir şekilde optimize edileceği ifade edilmektedir.

2.2. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Mekânsal Veri Yönetimi

CBS, tarımsal verilerin mekânsal boyutta organize edilmesi ve analiz edilmesi için güçlü bir araçtır. Hassas tarımda CBS kullanımı, özellikle tarım arazilerinin bölgesel özelliklere

göre özelleştirilmiş yönetimini mümkün kılmaktadır. Bu teknoloji tarımda aşağıdaki alanlarda kullanılmaktadır.

2.2.1. Arazi Kullanım Planlaması

CBS, tarım alanlarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi için arazi kullanım planlamasında önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu teknoloji, tarım alanlarının toprak türü, su kaynaklarına yakınlık, iklim koşulları, eğim ve bitki örtüsü gibi çok sayıda parametreye dayalı olarak detaylı bir şekilde sınıflandırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu tür sınıflandırmalar, çiftçilerin tarımsal faaliyetlerini daha bilinçli bir şekilde planlamalarına ve kaynaklarını daha verimli kullanmalarına katkı sunmaktadır (Mathenge & ark., 2022).

CBS'nin tarımda uygulanması, mahsul uygunluğu analizinden sulama stratejilerinin geliştirilmesine kadar geniş bir yelpazede faydalar sağlamaktadır. Örneğin, toprak türlerine dayalı analizlerin, belirli mahsul türlerinin hangi bölgelerde daha iyi yetiştirilebileceğini belirlemede kritik rol oynadığı belirtilmektedir. Benzer şekilde, su kaynaklarına olan mesafenin CBS ile değerlendirilmesi, sulama sistemlerinin tasarımı ve su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, iklim parametrelerinin CBS verileriyle haritalanması, bölgesel sıcaklık ve yağış koşullarına dayalı olarak mahsul çeşitliliği ve verimliliği artırmak için rehberlik etmektedir (Huang & Han, 2014).

Bunun yanı sıra, CBS'nin doğal afetlere ve çevresel risklere karşı duyarlılığı artırdığı ifade edilmektedir. Örneğin, sel riski yüksek bölgelerin veya erozyona yatkın alanların CBS yardımıyla belirlenmesi, bu tür risklere karşı koruyucu önlemler alınmasına olanak tanımaktadır. Bu durumun, özellikle tarım arazilerinin uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından büyük bir önem taşımaktadır (Dlamini & ark., 2023).

CBS'nin, yalnızca çiftçiler için değil, aynı zamanda tarım politikalarının oluşturulması ve uygulanmasında da stratejik bir araç olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle kuraklık veya su kıtlığı

riski bulunan bölgelerin belirlenmesinde ve bu alanlarda geliştirilecek politikaların yönlendirilmesinde CBS verileri etkili bir rehberlik sunmaktadır (Joshi & ark., 2023).

Sonuç olarak, CBS'nin tarımsal yönetimdeki bu çok yönlü uygulamaları hem yerel hem de bölgesel düzeyde daha sürdürülebilir ve verimli bir tarım yönetimi için güçlü bir araç olarak değerlendirilmektedir.

2.2.2. Sulama ve Gübreleme Yönetimi

Sulama ve gübreleme yönetimi, CBS ve IoT ile entegre edilmiş otomasyon teknolojileri sayesinde daha verimli hale getirilmiştir. Bu teknolojiler, tarımsal alanlarda su ve gübre kullanımını optimize ederek kaynak israfını önlemekte ve tarımsal verimliliği artırmaktadır. IoT tabanlı sistemler, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yoluyla sulama süreçlerini yönetmekte ve çevresel etkileri azaltmaktadır (Nyakuri & ark., 2022).

Nyakuri ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, IoT ve yapay zekâ tabanlı bir sulama ve gübreleme kontrol sisteminin, tarımsal üretimi artırmak için su ve gübre kullanımını hassas bir şekilde düzenlediği belirtilmiştir. Toprağın besin içeriği ve su seviyesi analiz edilerek, çiftçilerin yalnızca ihtiyaç duyulan miktarlarda kaynakları kullanmalarına imkân tanınmıştır. Bu sistemlerin, manuel yöntemlere kıyasla %91.7 oranında doğruluk sağladığı ve maliyetleri önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir.

Pincheirave arkadaşları (2021), çalışmalarında IoT tabanlı sensörler ile Blockchain teknolojisinin entegrasyonu sayesinde tarımsal su yönetimi için güvenli, enerji verimli ve sürdürülebilir bir otomasyon sistemi geliştirdiklerini belirtmişlerdir. Bu sistemin, su ve gübre kaynaklarının şeffaf ve eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlamak amacıyla Blockchain altyapısını kullandığı vurgulanmaktadır.

Bir başka çalışmada, güneş enerjisi ile çalışan IoT tabanlı akıllı bir gübreleme ve sulama sistemi geliştirilmiş ve bu sistemin su ve gübre kullanımında sürdürülebilirlik sağladığı rapor

edilmiştir. Bu sistemin hem enerji maliyetlerini düşürdüğü hem de tarımsal süreçlerin çevresel etkilerini azalttığı belirtilmiştir (Ahmad, Alvino & Marino, 2022).

CBS ve IoT'nin entegre edilmesiyle oluşturulan sulama ve gübreleme otomasyon sistemlerinin, ekonomik faydalar sağladığı ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunduğu görülmektedir. Bu teknolojilerin daha geniş ölçekte uygulanmasıyla, tarım sektöründe verimliliğin artacağı ve doğal kaynakların korunmasının destekleneceği değerlendirilmektedir.

2.2.3. Risk ve Afet Yönetimi:

CBS, doğal afetlerin tarımsal üretim üzerindeki etkilerini değerlendirme ve yönetme açısından etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, özellikle kuraklık, sel, toprak kayması ve diğer çevresel risklerin haritalandırılması ve analizinde kritik bir rol oynamaktadır (Chen, Mao & Zhao, 2022). CBS'nin sağladığı mekânsal analiz ve modelleme yetenekleri, afet risklerinin daha iyi anlaşılmasını ve bu risklere yönelik etkin stratejiler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

CBS, doğal afetlerin mekânsal dağılımını belirlemek için kullanılırken, bu süreçte verilerin görselleştirilmesi ve entegre analizi büyük önem taşımaktadır. Örneğin, sel riskleri için CBS tabanlı modeller, toprak eğimi, yağış miktarı ve bitki örtüsü gibi faktörleri analiz ederek tehlike düzeylerini ortaya koymaktadır. Bu tür analizlerin, tarım alanlarının korunmasına yönelik önlemlerin planlanmasında hayati önem taşıdığı vurgulanmaktadır (Zhu & Zhang, 2022).

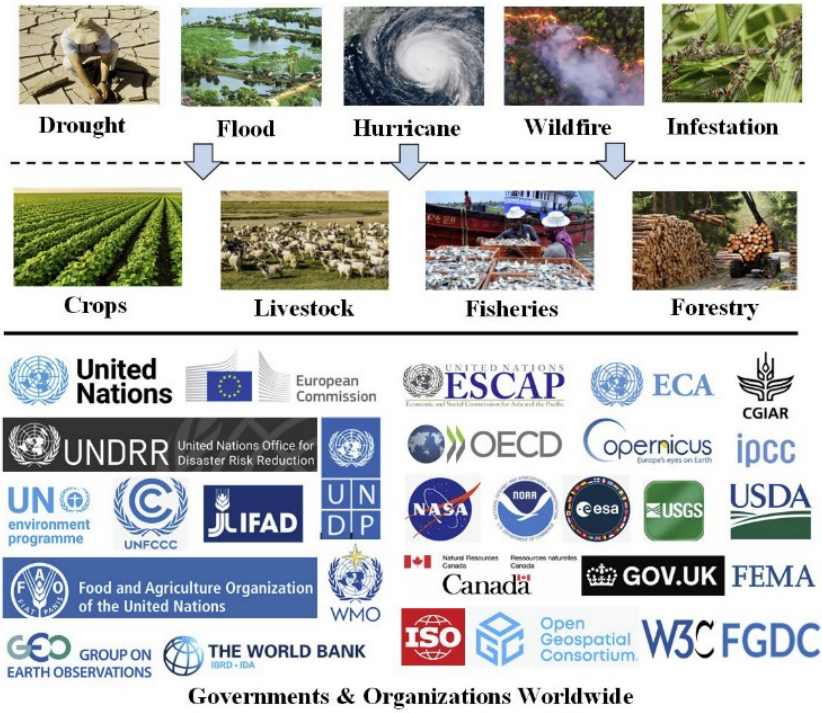
Kuraklık yönetiminde CBS'nin, tarım alanlarındaki su stresini belirlemek için kullanıldığı ve bu bilgilerin çiftçilere rehberlik ettiği belirtilmektedir. CBS'nin, geniş ölçekli verilerle birleştiğinde, mahsul kayıplarını en aza indirme ve üretim süreçlerini optimize etme potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir (Hu & ark., 2023).

CBS ayrıca, toprak kayması gibi afetlerin mekânsal analizinde de kullanılmaktadır. Bu analizler, özellikle riskli

bölgelerin tespiti ve bu bölgelerdeki tarımsal faaliyetlerin yönlendirilmesi için önemli bir araçtır. CBS'nin, toprak kayması risk değerlendirmelerinde, eğim, toprak türü ve yağış verilerini birleştirerek detaylı risk haritaları ürettiği belirtilmiştir (Nabukonde, Barakagira & Akwango, 2023).

CBS tabanlı risk yönetimi sistemlerinin tarım sektöründe uygulanması, yalnızca doğal afetlerin etkisini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda tarımsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına da katkı sağlamaktadır. Gelecekte, CBS'nin yapay zekâ ve büyük veri teknolojileriyle daha da entegre edilerek, afetlere karşı daha öngörülü ve etkili bir yönetim sağlanacağı düşünülmektedir (Abid & ark., 2021).

Mahsuller, ormanlar, hayvancılık ve balıkçılık gibi tarımsal sektörler; kuraklıklar, seller, kasırgalar, fırtınalar, depremler, orman yangınları, hastalıklar ve istila gibi çok çeşitli afetlere karşı hassastır. Şekil 4'te tarımsal afet yönetimine önemli ölçüde zaman ve çaba harcayan uluslararası, ulusal ve bölgesel hükümetler ve organizasyonlar görülmektedir.



Şekil 10: Dünya genelindeki başlıca aktörler (Hu & ark., 2023)

Bu sistemlerin geniş ölçekli kullanımı, hem tarım sektöründe ekonomik kayıpların azaltılması hem de çiftçilerin iklim değişikliği ve çevresel tehditlere karşı daha dayanıklı hale getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

2.3. Uzaktan Algılama ve CBS'nin Entegrasyonu

Uzaktan algılama ve CBS teknolojilerinin entegrasyonu, hassas tarımda önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu iki teknolojinin birlikte kullanımı, tarım arazilerindeki mekânsal ve zamansal değişimlerin daha iyi anlaşılmasını sağlarken, daha etkili ve verimli yönetim stratejilerinin uygulanmasına olanak tanımaktadır (Sishodia, Ray & Singh, 2020).

2.3.1. Entegrasyonun Faydaları

2.3.1.1. Verimlilik Artışı

Uzaktan algılama ile CBS'nin entegre edilmesi, tarımsal girdi yönetiminde büyük avantajlar sunmaktadır. Gübre ve sulama kaynaklarının etkin bir şekilde dağıtılması sağlanarak gereksiz kaynak tüketimi önlenmekte ve verimlilik artırılmaktadır. Multispektral görüntülerin CBS ile analiz edilmesi, mahsul sağlığı ve toprak durumuna ilişkin daha bilinçli müdahalelerin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır (Medennikov & Raikov, 2021).

2.3.1.2. Çevresel Sürdürülebilirlik

Bu entegrasyon, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel etkilerin en aza indirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Toprak nemi ve su stresi gibi parametrelerin uzaktan algılama ile izlenmesi, su kaynaklarının hassas bir şekilde yönetilmesine olanak tanımakta ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktadır (Verma & ark., 2023).

2.3.1.3. Ekonomik Kazanç

Uzaktan algılama ve CBS'nin entegre kullanımı, girdi maliyetlerini düşürerek çiftçilerin ekonomik kazançlarını artırmaktadır. Hassas haritalama yöntemleri sayesinde bitki sağlığı ve toprak özelliklerine uygun gübreleme ve sulama uygulamaları planlanabilmekte, böylece hem maliyetler azalmakta hem de ürün verimliliği yükselmektedir (Verma & ark., 2023).

2.3.1.4. İklim Değişikliği ile Mücadele

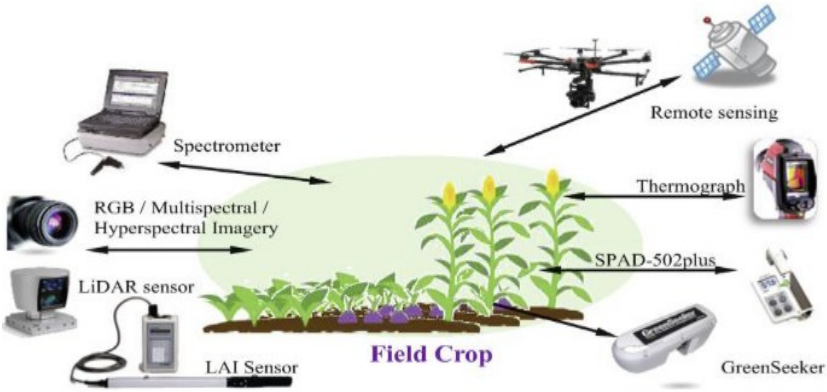
İklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkilerini yönetmekte uzaktan algılama ve CBS entegrasyonu önemli bir araçtır. Uzaktan algılama verileri, iklimsel değişimlerin etkilerini analiz etmek ve bu değişimlere uyum sağlamak için CBS ile birleştirilerek kullanılmaktadır. Tarımsal kuraklık izleme sistemleri ise kaynak planlamasının bölgesel ölçekte optimize

edilmesine olanak tanımaktadır (Rai & ark., 2023).

Şekil 5, hassas tarımda mahsul algılama sistemlerinin kullanımını temsil etmektedir. Bu sistemler, tarımsal alanlardaki bitki sağlığı ve çevresel koşulları değerlendirmek için çeşitli sensör ve cihazların entegre bir şekilde çalışmasını göstermektedir. Spektrometre, bitkilerin yansıttığı ışığı ölçerek yaprak ve bitki sağlığına dair detaylı veriler sağlamaktadır. RGB, multispektral ve hiperspektral görüntüler, bitkilerin farklı spektral bantlardaki yansımalarını analiz ederek stres, su ihtiyacı ve genel sağlık durumlarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. LIDAR sensörleri, bitkilerin 3D yapısını ve arazi topografyasını haritalayarak ayrıntılı mekânsal analizler sunmaktadır.

Buna ek olarak, yaprak alan indeksini (Leaf Area Index) ölçen LAI sensörleri, bitki örtüsünün yoğunluğunu belirlemekte önemli bir rol oynamaktadır. Termograf cihazları, bitki sıcaklıklarını analiz ederek su stresinin izlenmesini sağlamaktadır. SPAD-502 plus cihazı, yapraklardaki klorofil içeriğini ölçerek bitki besin durumu hakkında bilgi sunmaktadır. GreenSeeker, bitki büyümesi ve azot ihtiyacını değerlendirmekte kullanılan önemli bir araçtır. Uzaktan algılama ise uydu veya drone platformlarıyla geniş alanlardan veri toplayarak tarımsal faaliyetlerin yönetimine katkı sağlamaktadır.

Bu sistemlerin tamamı, tarımsal süreçlerde veri odaklı kararların alınmasını desteklerken, bitki sağlığını optimize etmek ve tarımsal verimliliği artırmak için etkili bir araç sunmaktadır.



Şekil 11: Hassas tarımda mahsul algılama (Verma & ark., 2023)

2.3.2. Gelecek Perspektifleri

Uzaktan algılama ve CBS entegrasyonunun, yapay zekâ ve büyük veri analitiği ile daha da ileri seviyelere taşınacağı öngörülmektedir. Bu ilerlemelerin, tarımsal süreçlerin otomasyonunu kolaylaştıracağı ve karar destek sistemlerinin doğruluğunu artıracağı düşünülmektedir. Ayrıca, veri analitiği ile güçlendirilen bu entegrasyonun, tarımsal yönetimin sürdürülebilirliğini artırarak ekonomik ve çevresel açıdan daha verimli hale gelmesine önemli katkılar sağlayacağı ifade edilmektedir (Barrile & ark., 2022)

Bu sistemlerin daha geniş ölçekte uygulanması, tarım sektöründe sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine ulaşmada kilit bir rol oynayacaktır.

3. Sonuç

Hassas tarımda uzaktan algılama ve CBS teknolojilerinin kullanımı, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği ve verimliliği açısından önemli yenilikler sunmaktadır. Bu teknolojilerin bireysel ve entegre kullanımı, tarım alanlarında mekânsal ve zamansal analizlerin daha hassas bir şekilde yapılmasını sağlamakta, bu sayede hem doğal kaynakların korunması hem de çiftçilerin ekonomik kazançlarının artırılması gibi çok yönlü

faydalar sağlamaktadır.

Uzaktan algılama teknolojileri, bitki sağlığından toprak nemi izlemeye, verim tahmininden çevresel risk analizine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu teknoloji, İHA, uydu sistemleri ve hiperspektral sensörler gibi araçlarla birleşerek tarımsal süreçlerin her aşamasında daha bilinçli kararlar alınmasına olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, CBS'nin mekânsal veri yönetimindeki katkıları, toprak türü, su kaynakları ve iklim koşulları gibi kritik faktörlerin analiz edilmesini mümkün kılmakta, çiftçilere özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır. Bu iki teknolojinin entegrasyonu, özellikle tarımsal girdi yönetiminin optimize edilmesi ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması için güçlü bir potansiyel barındırmaktadır.

Sulama ve gübreleme yönetiminde CBS ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu, kaynak kullanımında israfı önlerken çevresel etkileri en aza indirgemekte ve sürdürülebilir tarımsal süreçlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, risk ve afet yönetiminde CBS'nin sunduğu mekânsal analiz yetenekleri, kuraklık, sel ve toprak kayması gibi afetlerin etkilerini azaltmada etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir. Gelecekte, bu sistemlerin yapay zekâ ve büyük veri analitiğiyle desteklenerek daha öngörülü ve etkin bir yönetim sağlayacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak, uzaktan algılama ve CBS'nin hassas tarımda etkin bir şekilde kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu teknolojilerin geniş ölçekli uygulamaları, tarımsal üretimde verimliliği artırırken doğal kaynakların korunmasını sağlayarak gelecek nesiller için sürdürülebilir bir tarım sistemi inşa etme yolunda kritik bir rol oynayacaktır.

4. Kaynaklar

Abid, S. K., Sulaiman, N., Chan, S. W., Nazir, U., Abid, M., Han, H., … Vega-Muñoz, A. (2021). Toward an Integrated Disaster Management Approach: How Artificial Intelligence Can Boost Disaster Management. *Sustainability*, *13*(22). Doi:10.3390/SU132212560

Ahmad, U., Alvino, A., & Marino, S. (2022). Solar Fertigation: A Sustainable and Smart IoT-Based Irrigation and Fertilization System for Efficient Water and Nutrient Management. *Agronomy*, *12*(5). Doi:10.3390/agronomy12051012

Alexopoulos, A., Koutras, K., Ali, S. Ben, Puccio, S., Carella, A., Ottaviano, R., & Kalogeras, A. (2023). Complementary Use of Ground-Based Proximal Sensing and Airborne/Spaceborne Remote Sensing Techniques in Precision Agriculture: A Systematic Review. *Agronomy*, C. 13. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Doi:10.3390/agronomy13071942

Aljanabi, F. K., Dedeoğlu, M., & Şeker, C. (2024). Environmental Monitoring of Land Use/ Land Cover by Integrating Remote Sensing and Machine Learning Algorithms. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, *28*(4), 455-466. Doi:10.31272/jeasd.28.4.4

Barrile, V., Simonetti, S., Citroni, R., Fotia, A., & Bilotta, G. (2022). Experimenting Agriculture 4.0 with Sensors: A Data Fusion Approach between Remote Sensing, UAVs and Self-Driving Tractors. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *22*(20). Doi:10.3390/s22207910

Bouskour, S., Bahatti, L., & Zaggaf, M. H. (2023). The use of NDVI to improve cereals agriculture: A review. *2023 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, IRASET 2023*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Doi:10.1109/IRASET57153.2023.10153054

Chen, L., Mao, Y., & Zhao, R. (2022). GIS application in environmental monitoring and risk assessment. *2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing, ICGMRS 2022*, 908-917. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Doi:10.1109/ICGMRS55602.2022.9849269

Dlamini, L., Crespo, O., van Dam, J., & Kooistra, L. (2023). A Global Systematic Review of Improving Crop Model Estimations by Assimilating Remote Sensing Data: Implications for Small-Scale Agricultural Systems. *Remote Sensing*, C. 15. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Doi:10.3390/rs15164066

Fontanet, M., Fernàndez-Garcia, D., & Ferrer, F. (2018). The value of satellite remote sensing soil moisture data and the DISPATCH algorithm in irrigation fields. Hydrology and Earth system sciences, 22(11), 5889-5900. Doi:10.5194/hess-22-5889-2018

Hu, L., Zhang, C., Zhang, M., Shi, Y., Lu, J., & Fang, Z. (2023). Enhancing FAIR Data Services in Agricultural Disaster: A Review. *Remote Sensing*, C. 15. MDPI. Doi:10.3390/rs15082024

Huang, J., & Han, D. (2014). Meta-analysis of influential factors on crop yield estimation by remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, *35*(6), 2267-2295. Doi:10.1080/01431161.2014.890761

Joshi, A., Pradhan, B., Gite, S., & Chakraborty, S. (2023). Remote-Sensing Data and Deep-Learning Techniques in Crop Mapping and Yield Prediction: A Systematic Review. *Remote Sensing*, C. 15. MDPI. Doi:10.3390/rs15082014

K S, S., Moinuddin, Belagalla, N., T. N., S., Abhishek, G. J., Kumar, V., & Tiwari, A. (2024). Revolutionizing Agriculture: Innovative Techniques, Applications, and Future Prospects in Precision Farming. *Journal of Scientific Research and Reports*, *30*(8), 405-419. Doi:10.9734/jsrr/2024/v30i82263

Kouadio, L., El Jarroudi, M., Belabess, Z., Laasli, S. E., Roni, M. Z. K., Amine, I. D. I., … Lahlali, R. (2023). A Review on UAV-Based Applications for Plant Disease Detection and Monitoring. *Remote Sensing*, C. 15. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Doi:10.3390/rs15174273

Mathenge, M., Sonneveld, B. G. J. S., & Broerse, J. E. W. (2022). Application of GIS in Agriculture in Promoting Evidence-Informed Decision Making for Improving Agriculture Sustainability: A Systematic Review. *Sustainability (Switzerland)*, C. 14. MDPI. Doi:10.3390/su14169974

Medennikov, V., & Raikov, A. (2021). Integration of Earth Remote Sensing Data on the Digital Platform of Russian Agriculture. *2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 1-6. Doi:10.1109/ITNT52450.2021.9649240

Mena, F., Pathak, D., Najjar, H., Sanchez, C., Helber, P., Bischke, B., ... & Dengel, A. (2024). Adaptive Fusion of Multi-view Remote Sensing data for Optimal Sub-field Crop Yield Prediction. arXiv preprint arXiv:2401.11844.

Muruganantham, P., Wibowo, S., Grandhi, S., Samrat, N. H., & Islam, N. (2022). A Systematic Literature Review on Crop Yield Prediction with Deep Learning and Remote Sensing. *Remote Sensing*, C. 14. MDPI. Doi:10.3390/rs14091990

Nabukonde, A., Barakagira, A., & Akwango, D. (2023). The Use of Geographical Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) Technologies in Generation of Information Used to Mitigate Risks from Landslide Disasters: An Application Review. *Archives of Current Research International*, *23*(2), 43-49. Doi:10.9734/ACRI/2023/V23I2558

Nyakuri, J., Bizimana, J., Bigirabagabo, A., Kalisa, J., Gafirita, J., Munyaneza, M., & Nzemerimana, J. (2022). IoT and AI Based Smart Soil Quality Assessment for Data-Driven Irrigation and Fertilization. *American Journal of Computing and Engineering*. Doi:10.47672/ajce.1232.

Pincheira, M., Vecchio, M., Giaffreda, R., & Kanhere, S. S. (2021). Cost-effective IoT devices as trustworthy data sources for a blockchain-based water management system in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *180*. Doi:10.1016/j.compag.2020.105889

Rai, R. K., Karada, M. S., Mishra, R., Agnihotri, D., Patel, K. K., Thakur, S., & Singh, D. (2023). Transformative Role of Remote Sensing in Advancing Horticulture: Optimizing Sustainability, Efficiency and Resilience. *International Journal of Environment and Climate Change*, *13*(10), 3559-3567. Doi:10.9734/ijecc/2023/v13i103026

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, *12*(19), 1-31. Doi:10.3390/rs12193136

Verma, B., Porwal, M., Jha, A. K., Vyshnavi, R. G., Rajpoot, A., & Nagar, A. K. (2023). Enhancing Precision Agriculture and Environmental Monitoring Using Proximal Remote Sensing. *Journal of Experimental Agriculture International*, *45*(8), 162-176. Doi:10.9734/jeai/2023/v45i82168

Zambrano, P., Calderon, F., Villegas, H., Paillacho, J., Pazmino, D., & Realpe, M. (2023). UAV Remote Sensing applications and current trends in crop monitoring and diagnostics: A Systematic Literature Review. *2023 IEEE 13th International Conference on Pattern Recognition Systems, ICPRS 2023*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Doi:10.1109/ICPRS58416.2023.10179038

Zhu, Z., & Zhang, Y. (2022). Flood disaster risk assessment based on random forest algorithm. *Neural Computing and Applications*, *34*(5), 3443-3455. Doi:10.1007/S00521-021-05757-6

BIDGE