

SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA

SU VE AKILLI TARIM

UYGULAMALARI



Editör
HASAN ÖZ



BİDGE Yayınları

Sürdürülebilir Tarımda Su ve Akıllı Tarım Uygulamaları

Editör: HASAN ÖZ

ISBN: 978-625-8567-43-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

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



ÖNSÖZ

Tarımsal üretim sistemleri; iklim değışikliğı, su kaynaklarının azalması, çevresel baskılar ve artan gıda talebi nedeniyle tarihinin en kritik dönüşüm süreçlerinden birini yaşamaktadır. Özellikle kuraklık riskinin giderek arttığı Akdeniz havzasında, tarım sektörünün sürdürülebilirliği; suyun etkin yönetimi, ekosistem temelli yaklaşımlar ve yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, tarımsal üretimde hem bitkisel hem de hayvansal sistemleri kapsayan bütüncül çözümlerin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.

Bu kitap, sürdürülebilir tarım anlayışını; su yönetimi, biyolojik destek mekanizmaları, uzaktan algılama ve dijital teknolojiler, düşük maliyetli otomasyon sistemleri ve hayvansal üretimde çevresel uyum başlıkları altında ele almayı amaçlamaktadır.

Eserde sunulan çalışmalar, yalnızca teorik çerçevelerle sınırlı kalmayıp, saha verileri, sayısal analizler ve uygulamaya dönük değerlendirmelerle desteklenmiştir. Bu yönüyle kitap; akademisyenler, lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar, tarım ve çevre alanında çalışan uzmanlar ile politika yapıcılar için önemli bir başvuru kaynağı olmayı hedeflemektedir.

Editör olarak temel amacımız, disiplinler arası bir bakış açısıyla sürdürülebilir tarım uygulamalarına bilimsel katkı sağlamak ve iklim değışikliğı koşullarında tarımsal üretimin geleceğine ışık tutacak nitelikli bir eser ortaya koymaktır. Bu çalışmada emeğı geçen tüm yazarlarımıza ve değerlendirme sürecine katkı sağlayan hakemlerimize teşekkür ederiz.

Prof. Dr. Hasan ÖZ

ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

STRATEGIES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE: THE WATER FOOTPRINT PERSPECTIVE	1
--	---

TUĞBA YETER, CEREN GÖRGİŞEN, GONCA KARACA BİLGİN

MYCORRHIZA-ASSISTED WATER MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE UNDER DROUGHT CONDITIONS	17
---	----

ROHAT GÜLTEKİN, AYŞE ENGİN, HİLAL GÖKÇE NALBANTOĞLU

GOOGLE EARTH ENGINE TABANLI UZAKTAN ALGILAMA YAKLAŞIMIYLA ANTALYA'DAKİ ÖRTÜ ALTI TARIM ALANLARINDA YÜZEY SICAKLIĞI VE HAVA KİRLİTİCİ GAZLAR ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ANALİZİ	41
--	----

ESRA TAN YÜCESOY, NAMİK KEMAL SÖNMEZ, BATUHAN KARTAL

DÜŞÜK MALİYETLİ OTOMASYON SİSTEMLERİNİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ TARIMSAL ALANLARA UYGULANABİLİRLİĞİ	60
---	----

UMUT MUCAN, EZGİ KURTULMUŞ

FARKLI ALTLIK MALZEMELERİNİN BROYLAR YETİŞTİRİCİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ	89
--	----

HASAN ÖZ

BÖLÜM 1

STRATEGIES FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE: THE WATER FOOTPRINT PERSPECTIVE

TUĞBA YETER¹
CEREN GÖRGİŞEN²
GONCA KARACA BİLGİN³

Introduction

Climate change and global warming are seriously threatening natural life both globally and in our country. With the ever-increasing population, per capita water consumption is also rising, and the increase in water pollution due to industrial activities is undeniable. This situation puts even more pressure on existing water resources. Today, at least 50% of the world's population, approximately 4 billion people, live under extreme water stress for at least one month of the year (Kuzma et al., 2023). Living with this level of stress not only jeopardizes water, food, and energy security

¹ PhD, Soil, Fertilizer, and Water Resources Central Research Institute, Orcid: 0000-0002-0586-1366

² PhD, Soil, Fertilizer, and Water Resources Central Research Institute, Orcid: 0000-0002-8348-1094

³ PhD, Directorate General of Agricultural Research and Policies, Orcid: 0000-0002-5915-873X

but also confronts people with the responsibility of ensuring the sustainability of water resources and passing them on to future generations. While in the past, water resource management was generally addressed at the local, national, or basin level, in recent years, with the exposure of water resources to global changes, many researchers have begun to address it at the international level. In this context, the concept of "Water Footprint" has been developed to support water management. The concept of water footprint was first introduced in 2002 by Arjen Hoekstra at UNESCO-IHE, the largest organization in the world providing education on water issues, located in the Netherlands (Sandu, Virsta, 2021). This term refers to the amount of clean water resources used by an individual, community, or industry for the goods or services it consumes or produces (Alper, 2015). Especially in a period where the effects of global climate change are felt, estimating, modeling, and accurately managing water capacities and consumption are of great importance.

Figure 1. Water footprint



Given that Earth's water resources are limited, the need for quality and quantity is rising. Tools like the water footprint show both the volume and type of water used (green, blue, grey) and when

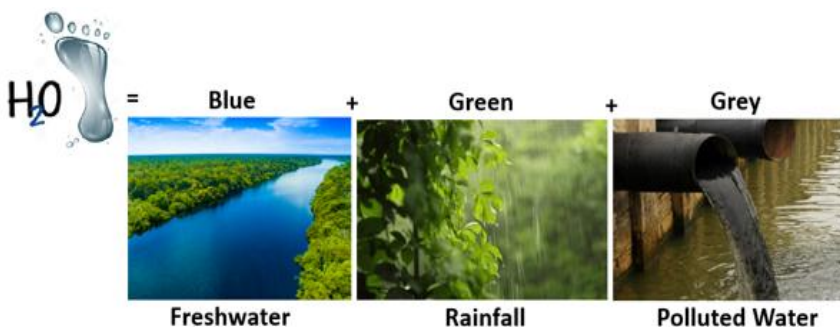
and where it's used. They are vital for managing water efficiently and ensuring a sustainable future.

All products, goods, and services we consume use a large amount of water, both directly and indirectly. The water footprint helps evaluate the demand for freshwater based on time, place, pollution, and sustainability. It measures our direct water use and our indirect, hidden consumption.

Elements of Water Footprint

The water footprint measures the impact of water use and pollution on freshwater resources. It includes three components; blue, green, and grey water footprint.

Figure 2. Elements of a water footprint



Blue Water Foodprint

The blue water footprint measures the total volume of freshwater used for production. It captures the gross water drawn from surface and groundwater sources, feeding the irrigation, industry, and daily life.

- Agricultural irrigation,
- Drinking water, and
- Industrial processes all contribute to this footprint.

In agriculture, the blue water footprint reflects the evaporation losses, plant consumption, and drainage. Meanwhile, for industry and drinking needs, it quantifies the water supplied from surface and groundwater within a basin. Together, these elements paint a vivid picture of our water reliance.

Green Water Footprint

The green water footprint measures the rainwater needed to produce a good. It specifically looks at the rainwater stored in soil and used by plants through transpiration and evaporation. This type of water is mainly from precipitation that supports gardens and fields and is heavily used by humans. The green water footprint does not recharge groundwater; it remains in the soil or on vegetation for a while. Green water can help crops grow, but not all of it is used effectively. Evaporation from the soil happens, and not every region or season is ideal for crops. In summary, the rainwater in the green water footprint stays in the soil temporarily and does not mix with groundwater. Since rainfall affects green water supply and demand, climate change and variability must be considered when assessing a region's green water needs

Figure 3. Green water footprint



Grey Water Footprint

The grey water footprint measures pollution. It shows how much fresh water is needed to dilute pollution from producing products or services. In simple terms, it indicates the water needed to offset environmental damage from polluted water. For instance, paints, chemicals, and other substances in factories can contaminate water. The clean water required to reduce this pollution to safe levels is the grey water footprint.

Water Footprint in Production

Water is essential for producing goods and services in a country. The water footprint of production shows how much water is used in homes, industries, and agriculture, no matter where the products are consumed (Türkyılmaz, 2010). This footprint helps us understand water usage and whether it's sustainable. In Türkiye, the water footprint of production is around 140 billion m³ per year (Turan, 2017). When we look at sectors, agriculture takes the largest share at 89%. Domestic use makes up 7%, while industrial production accounts for 4% of the total water footprint (Anonymous, 2014).

Figure 4. Türkiye's water footprint



In Türkiye, 64% of the water footprint from production is green water, 19% is blue, and 17% is grey (Turan, 2017). Green water plays a key role in crop production, which is crucial for agriculture. For example, most of the water used for grazing comes from green water. This highlights the importance of rainfall for farming. Blue water, making up 19%, points to the need for effective irrigation practices. These practices are vital for sustaining our water resources.

Table 1. Water footprint of different industries

Sector	Material Production	Supplier	Direct Operation	Product Use
Clothes	  			
Technology				
Drink	  		 	
Food	  		 	
Drug				
Forest Products			 	
Mining	 		 	
Electric	 		 	
Power/ Energy	 		 	

Source: CERES/Pacific Institute (2009)

Table 1 illustrates that all products have varying water footprints at different production stages. In Türkiye, recent climate change and drought conditions have led to increased water usage in agriculture. To safeguard and sustain water resources, it is essential to lessen the strain on them. Implementing high-efficiency irrigation methods, such as drip irrigation, can enable the production of goods with a lower blue water footprint, maximizing yield and conserving

water with every drop used for irrigation and production, thereby promoting sustainable practices.

Water Footprint in Agricultural Irrigation

Türkiye is situated in a semi-arid climate zone, with rainfall varying by region and season. The average annual rainfall is 537 mm, and the annual per capita water availability is 1.308 m³, categorizing it as a water-scarce country (Anonymous, 2025). Climate change and drought, coupled with a growing global population, are contributing to a decline in our existing water resources. This underscores the importance of using our water resources efficiently, particularly in agricultural irrigation, for the future. Inefficient water use in agriculture can severely impact farmland and water availability, leading to rapid resource depletion and increased yield losses.

Climate change is indeed affecting Türkiye, with noticeable signs of drought and desertification. Therefore, it is essential to adopt water efficiency practices that enhance the green water footprint in agriculture. Research indicates that corn, and cotton are significant consumers of blue water in Türkiye. Thus, improving irrigation system efficiency and minimizing surface water usage will be critical for sustainable water resource management. Given that agriculture accounts for 77% of water usage, the need for irrigation systems that prevent drainage and salinity issues while enhancing yield and quality with reduced labor and water is increasingly important. Utilizing sprinkler and, particularly, drip irrigation methods will allow for crop cultivation without stressing plants and will help decrease the agricultural water footprint by using less irrigation water. At the same time, improving the efficiency of blue water use in agricultural irrigation can be achieved through the modernization of existing on-farm development systems and irrigation infrastructures (Bilgen, 2014).

Reducing Water Footprint in Production

In recent years, agricultural production has faced challenges due to climate change. By 2050, it is expected that drought severity and the areas impacted will increase significantly, resulting in water scarcity. Therefore, efficient water use is essential, necessitating a reduction in the water footprint. Developed countries typically have lower water footprints than developing countries, primarily because they use less water per unit of production. To enhance water efficiency in agriculture and decrease the water footprint, we must optimize rainfall utilization and improve the efficiency of green water use. This can involve altering crop patterns or adjusting planting and harvesting schedules to align with rainfall periods, as well as increasing research into water-efficient agricultural practices and the use of treated wastewater. Additionally, preventing water losses across all sectors, establishing a supportive legal framework, and raising public awareness are crucial steps.

Reducing the water footprint is vital for sustainability and environmental protection. By managing water consumption during production, we can safeguard water resources for future generations. In the agricultural sector, which consumes the most water, we can implement practices such as mulching, utilizing green and grey water, recycling wastewater, and adopting water saving irrigation methods to effectively reduce the water footprint.

Efficient Irrigation Technologies

To reduce Türkiye's water footprint, it is imperative to enhance water efficiency in the agricultural sector, which accounts for the largest share of usage. Implementing controlled water use based on actual crop requirements, while minimizing waste, is one of the most effective strategies. The success of this approach relies heavily on the adoption of Efficient Irrigation Technologies. Traditional, inefficient irrigation systems often result in substantial

water waste, soil erosion, and decreased agricultural yields. In contrast, modern pressurized methods, such as subsurface and surface drip irrigation, deliver water directly to the plant root zone. By minimizing evaporation and deep percolation losses, these technologies not only optimize Blue Water consumption but also prevent nutrient runoff, thereby reducing the Grey Water footprint. Consequently, the shift towards these high-efficiency systems significantly lowers the overall water footprint of production.

Figure 5. Modern irrigation systems

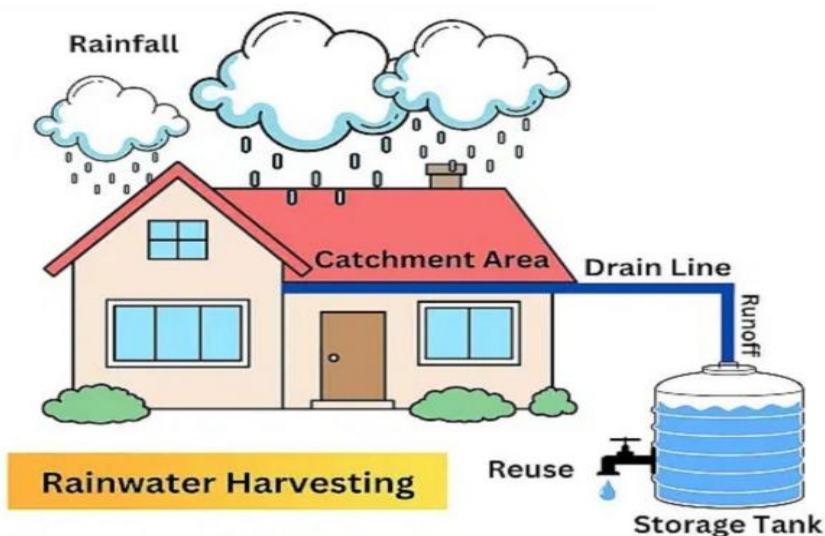


Water Harvesting

Changes in rainfall patterns and amounts due to climate change have led to various environmental challenges. While some regions experience sudden and heavy rainfall, others face increased drought, desertification risks, and dwindling water resources, highlighting the importance of water harvesting. Additionally, rising urbanization and the creation of impermeable surfaces prevent rainwater from replenishing groundwater, disrupting the natural water cycle and leading to flooding. Rainwater can be collected and stored from various surfaces, particularly roofs, using drainage systems. This stored rainwater can be utilized for watering parks and gardens or washing vehicles. By using rainwater as an alternative source, we can alleviate pressure on surface water resources and

effectively reduce our water footprint. Rainwater is also widely used in agricultural irrigation. However, relying solely on natural rainfall for production poses risks due to unpredictable climate factors. Therefore, it is essential to collect and store rainwater for later use.

Figure 6. Rainwater harvesting



Implementing water harvesting systems will provide significant benefits for agricultural production and help minimize our water footprint. To optimize water resource management, we must enhance efforts to utilize green water effectively while conserving blue water. Reducing the green water footprint can be achieved by maximizing the use of rainfall, making the application of water harvesting techniques crucial.

In agricultural irrigation, rainwater is a widely utilized resource. However, depending on natural rainfall for production can be risky due to unpredictable factors, such as climate change. Therefore, it is essential to collect and store rainwater for use not only during storms but also later on. Implementing water harvesting systems can provide significant advantages in agricultural

production and help reduce the water footprint. To maximize the efficient use of water resources, we should enhance our efforts to utilize green water effectively while conserving blue water. Increasing the green water footprint can be achieved by optimizing rainfall use, which necessitates the adoption of water harvesting techniques.

Wastewater Use

Treating and reusing wastewater is one of the most effective strategies to reduce the water footprint, which represents the total amount of water consumed and polluted during the production of a product or service. In traditional production models, both the withdrawal from freshwater sources (Blue Water Footprint) and the volume of water required to dilute the pollution load discharged into nature (Grey Water Footprint) are significantly high. However, reintroducing wastewater into the system as a "circular resource" fundamentally alters this balance. Using treated wastewater in agriculture or industry lowers the blue water footprint by reducing withdrawals from rivers and groundwater, while simultaneously limiting the grey water footprint by minimizing the quantity of pollutants discharged. This integration directly supports ecological sustainability by alleviating the pressure on water resources. Yeter & Görgişen, (2024) stated that the most important savings that can be made in terms of water resource sustainability are the treatment of wastewater, the collection of rainwater, and the reuse of domestic wastewater, known as gray water. They stated that the use of such water should be increasingly widespread, especially in the agricultural sector, where consumption is highest.

Another effective way to reduce our water footprint is by recycling and reusing water. With drought, climate change, and population growth, our water resources are in danger. Reclaiming rapidly depleted wastewater can help extend the life of our existing resources. Wastewater is water from which unwanted substances

such as salts, minerals, chemicals, microorganisms, and heavy metals have been largely removed through various treatment methods. The aim is to make the water clean, safe, and suitable for its intended use. Treating and reusing wastewater in irrigation systems not only protects the environment but also ensures that our current water resources last longer.

Mulching

Mulching helps lower soil temperature, minimizes evaporation, and retains moisture for an extended period. This practice not only conserves water during production but is also recognized as an effective method for reducing the agricultural water footprint. It serves multiple purposes, particularly in arid regions, including water conservation and erosion control (Bhardwaj, 2013). Research indicates that mulching positively impacts the reduction of the water footprint. Additionally, materials used for mulching, such as cereal straw, tree bark, leaves, and ground pruning residues, contribute to water conservation in the soil while enriching it with organic matter.

Figure 7. Mulching Techniques



Result

The water footprint of a product can vary significantly depending on the region in which it is grown (Chapagain & Hoekstra, 2004; Dang, et al., 2022). Additionally, the water footprint of any product can change over time within the same region (Zhuo, et al., 2016). One key factor influencing this variation is climate change. A high-water footprint in a region can result from its climatic conditions or the substantial virtual water consumption associated with the products produced there (Hoekstra & Chapagain, 2007). To promote sustainability in water resources, particularly in arid and semi-arid areas, it is essential to develop strategies to reduce the water footprint of production, decrease reliance on blue water in agriculture, and enhance the use of green water. Furthermore, integrating non-conventional water resources, such as treated wastewater, into irrigation schedules is a pivotal strategy. This approach not only alleviates the pressure on freshwater (blue water) reserves but also mitigates the grey water footprint by reducing pollutant discharge. Since the green water usage for evaluated products falls below the global average, improving green water use efficiency is crucial. Research focused on maximizing green water utilization while minimizing blue water consumption will enhance water resource efficiency. It is advisable to cultivate alternative crops that have lower water footprints and economic viability rather than those with high water footprints. Assessing the water footprint across different regions can inform effective water resource management and future strategies. Understanding the water footprint value is vital for evaluating investments in dams, wastewater treatment plants, and irrigation systems, particularly in water-scarce, arid regions (İlhan, 2011). Moreover, raising public awareness about the efficient use of green water and the conservation of blue water will support the establishment of crop patterns that align with climate conditions and optimize green water utilization, ultimately boosting productivity.

The integrated evaluation of existing hydrological and agricultural data within a systematic framework enables the development of future-oriented scenarios and the timely implementation of economically efficient irrigation planning; accordingly, resource-based optimum cropping pattern policies facilitate the sustainable reduction of agricultural water use and the associated water footprint (Bilgen, 2014).

In summary, for improved and rational water management, it is necessary to analyze the virtual water consumption, blue water usage, and wastewater reuse potential of specific products across various regions. Increasing the focus on water footprint studies in our country will aid in the formulation of comprehensive water and agricultural product policies.

References

Alper, F. (2015). Sürdürülebilirlik kavramı içerisinde su ayak izi: Tekstil sektörü örneği.

Anonymous, (2014). Türkiye'nin su ayak izi raporu. Su, üretim ve uluslararası ticaret ilişkisi, WWF-Türkiye.

Anonymous, (2025).
<https://www.mgm.gov.tr/FILES/arastirma/yagis-degerlendirme/2024yagisdegerlendirmesi.pdf>. Erişim: 03.12.2025

Bhardwaj, R. L. (2013). Effect of mulching on crop production under rainfed condition-a review. DOI- 10.5958/j.0976- 0741.34.3.003

Bilgen, K.G., (2014). Tarımda su ayak izi. 12. Ulusal Kültürteknik Sempozyumu, Tekirdağ, 2014.

CERES/Pacific Institute, (2009). Water scarcity and climate change: Growing Risks for Businesses and Investors.

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). Water footprints of nations.

Dang, Y., Qin, L., Huang, L., Wang, J., Li, B., & He, H. (2022). Water footprint of rain-fed maize in different growth stages and associated climatic driving forces in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 263, 107463.

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water resources management*, 21(1), 35-48.

İlhan, A. (2011). Yeni bir su politikasına doğru. Sosyal Değişim Derneği, İstanbul.

Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (25). Countries, housing one-quarter of the population, face extremely high water stress. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries> (2023).

Sandu, M. A., & Vîrsta, A. (2021). The water footprint in context of circular economy. *AgroLife Scientific Journal*, 10(2).

Turan, E. S. (2017). An evaluation of Turkey's water footprint.

Türkyılmaz, A. (2010). Dünyada ve ülkemizde su: Su yönetimi ve mevzuatı. Türkiye Belediyeler Birliği.

Yeter, T. & Görgişen, C. (2024). Climate change and alternative water resources. *Tarımsal Yapılar ve Sulama. Yaz Yayınları*. 34-53. E-ISBN 978-625-6171-10-7.

Zhuo, L., Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y., & Wada, Y. (2016). Inter-and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961–2009). *Advances in water resources*, 87, 29-41.

BÖLÜM 2

MYCORRHIZA-ASSISTED WATER MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE UNDER DROUGHT CONDITIONS

ROHAT GÜLTEKİN¹
AYŞE ENGİN²
HİLAL GÖKÇE NALBANTOĞLU³

Introduction

Water is a fundamental resource for plant growth, ecosystem functioning, and agricultural productivity. However, global freshwater availability is under increasing pressure due to climate change, population growth, and intensifying demands from industry and municipalities (Biswas et al., 2025). Agriculture already accounts for about 70% of global freshwater use, and in many semiarid and Mediterranean regions, water scarcity has become a limiting factor for crop yield and food security (Ingrao et al., 2023;

¹ Dr, Agriculture Enginner, Soil, Fertilizer and Water Resources Central Research Institute, Agricultural Irrigation and Land Reclamation, Orcid: 0000-0001-9834-4765

² MSc Biologist, Soil Fertilizer and Water Resources Central Research Institute, Soil and Plant Nutrition, Orcid: 0000-0001-6868-6561

³ MSc Biologist, Soil Fertilizer and Water Resources Central Research Institute, Soil and Plant Nutrition, Orcid: 0000-0001-9525-1491

Salman, 2016). In Mediterranean-climate countries such as Türkiye, prolonged dry seasons, erratic rainfall, and groundwater depletion exacerbate the challenge of sustaining crop production under water-limited conditions.

In face of these pressures, conventional strategies such as improved irrigation technologies or rainwater harvesting are necessary but often insufficient when water supply becomes extremely limited or unpredictable (Çetin, et al., 2021). To build more resilient agricultural systems, integrating biological approaches that enhance a plant's capacity to access water is increasingly seen as a promising complementary strategy. Among these, Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) symbiosis stands out as a biotic tool to support plant water uptake and drought tolerance.

AMF form mutualistic relationships with the roots of most terrestrial plants, extending their hyphal networks into the soil matrix and effectively increasing the absorptive surface area beyond the root zone (Chandrasekaran et al., 2022; Tang et al., 2022; Abdalla et al., 2023). Through this enhanced connectivity, AMF improve water fluxes to the plant, maintain higher soil-to-root hydraulic conductance under drying conditions, and buffer against steep gradients in soil water potential (Abdalla et al., 2023). In addition, AMF can modulate physiological responses of their host plants—such as improved osmotic adjustment, enhanced antioxidant enzyme activity, and adjustment of hormonal signalling to better cope with water deficit (Tang et al., 2022; Bahadur et al., 2019).

Despite these known advantages, several gaps remain. First, many studies focus on staple cereals or major crops (e.g., maize, wheat) with limited attention to medicinal or specialty species grown in water-limited conditions (e.g., *Nigella sativa*). Second, the relative performance of different AMF species under severe irrigation deficits (e.g., $\leq 25\%$ of field capacity) is not well characterized, especially in Mediterranean or semi-arid climates. This knowledge gap limits the translation of experimental insights into field-scale, resilient agricultural practices. In this chapter, we aim to synthesize

evidence from recent literature, analyse the mechanisms by which AMF contribute to water management under drought, and highlight the potential for deploying AMF-assisted systems in Mediterranean-zone agriculture under stringent water constraints.

Agricultural Drought: Causes, Impacts, and the Need for Sustainable Water Management

Agricultural drought is a type of drought that occurs when soil moisture becomes insufficient for plants to continue growing and developing, directly affecting agricultural production. Unlike meteorological drought, it is closely related not only to rainfall deficiency but also to temperature increase, rising evaporation-transpiration rates, soil properties, and agricultural management practices (FAO, 2012; Mishra and Singh, 2010). Particularly in regions located in the Mediterranean climate zone, the seasonal irregularity of rainfall and increased evapotranspiration during the summer months increase the frequency and severity of agricultural drought.

Global climate change stands out as one of the main causes of agricultural drought. According to reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), rising air temperatures and changes in rainfall patterns are causing soil moisture to decrease and irrigation needs to increase in semi-arid and arid regions (IPCC, 2022). This situation not only causes a loss of productivity, but also threatens the long-term sustainability of agriculture by increasing pressure on water resources. Indeed, the agricultural sector currently accounts for approximately 70% of total freshwater use worldwide, and this proportion is even higher in regions where water scarcity is increasing (FAO, 2020).

The effects of agricultural drought are multifaceted. From a plant physiology perspective, water stress leads to a decrease in photosynthesis rate, reduced stomatal conductance, limited nutrient uptake, and ultimately biomass and yield losses (Farooq et al., 2009). Prolonged drought conditions weaken the resilience of agricultural

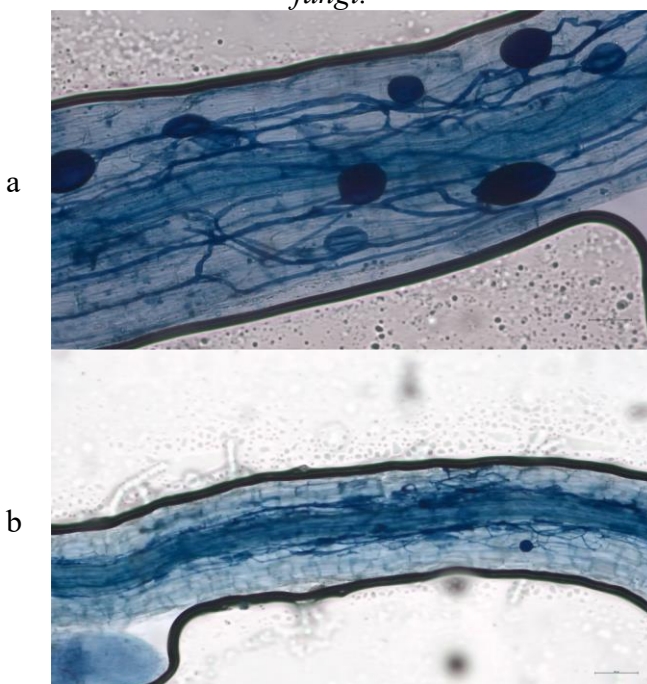
ecosystems by causing soil degradation, loss of organic matter, and reduced microbial activity. This situation poses serious risks to food security, particularly in small-scale and irrigation-dependent agricultural systems. In this context, developing sustainable water management approaches in agriculture has become a crucial necessity. Methods such as drip irrigation, deficit irrigation, rainwater harvesting, and the use of recycled wastewater in agriculture aim to increase water use efficiency (Feres and Soriano, 2007; FAO, 2017). Nonetheless, these technical solutions may have limited effectiveness unless supported by the plant's physiological water use capacity. Hence, biological approaches focusing on plant-soil-microorganism interactions have emerged in recent years as complementary and sustainable tools in combating agricultural drought. Arbuscular mycorrhizal fungi are considered one of the symbiotic organisms with the highest potential to support water management among these biological approaches.

Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF): Biology and Symbiotic Mechanisms

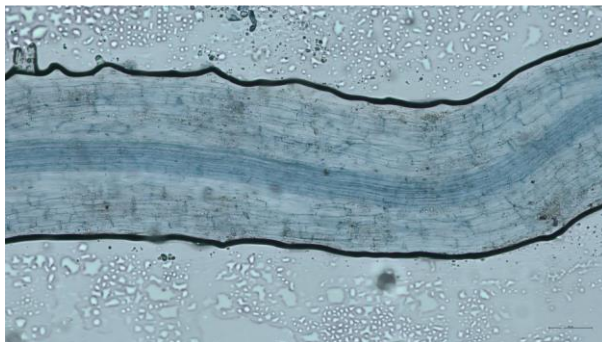
Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and the symbiosis they form with plant roots, known as mycorrhiza, represent an extremely widespread and effective relationship. AMF belong to the Glomeromycota phylum and are biotrophic fungi that cannot survive without a host plant. They form symbiosis with more than 80% of land plants (Boyno et al. 2025). The similarity of hyphae and spores found in fossil roots from the Devonian (approximately 400 million years ago) and Ordovician (approximately 460 million years ago) periods to modern mycorrhizal fungi suggests that the evolutionary history of AMF dates back to these periods. Since this period also coincides with the emergence of terrestrial plants, it is suggested that AMF and land plants co-evolved. In this sense, mycorrhizal fungi may have played an important role in facilitating the transition of plants to land (Remy et al. 1994, Redecker et al. 2000). Plant-AMF symbiosis alters and regulates root physiology and plant growth by influencing physiological, biochemical, and molecular mechanisms that enhance water and nutrient uptake. The altered root physiology

supports root-stem communication and contributes to the maintenance of plant homeostasis. Thus, it improves drought-induced growth disorders by regulating the expression of stress-related genes and proteins and adapts the plant phenotype to stress factors. AMF symbiosis produces external mycelium to ensure the plant's continued water uptake and increases lateral root formation with its hyphae, thereby expanding the root surface area (Figure 1). All this water and nutrient exchange occurs through arbuscules formed in the plant's root cells (Bahadur et al. 2019).

Figure 1. Root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi.



c



Reference: Gültekin et al., 2025

a- Good AMF root colonization. b- Weak AMF root colonization. c- No AMF root colonization.

Chemicals secreted by plant roots, known as root exudates, initiate symbiosis. The attraction of AMF or other microorganisms to the rhizosphere occurs through the call of root exudates. Under stress conditions such as inorganic phosphate deficiency and drought, strigolactones, the main component of root exudates, are secreted by plant roots. These secreted strigolactones (SL) stimulate the branching and elongation of AMF hyphae, increasing their chances of reaching the plant root (Waters et al. 2017). AMF attempts to alleviate the plant's water deficiency by altering the content of phytohormones such as strigolactones, jasmonic acid (JA), and abscisic acid (ABA) and by increasing water conductivity (Fernández-Lizarazo et al. 2016). They increase the plant's drought tolerance by regulating specific genes involved in the ABA signaling pathway (Xu et al. 2018).

AMF promotes nutrient uptake in host plants exposed to drought conditions. In *Poncirus trifoliata* plants inoculated with *G. versiforme*, increases in P, K, Ca, and Fe levels were observed in leaves and roots under drought conditions (Wu and Zou, 2009). AMF not only increases the uptake of nutrient elements but also enhances the availability of P in the soil and the host plant's P uptake capacity (Halder et al. 2015). Plants that form a symbiotic relationship with AMF have been observed to adapt better to osmotic stress. Osmotic stress is tolerated by increasing the synthesis of metabolites that act

as osmolytes, such as sugar and proline, which are mostly secreted by the plant, and by altering the biochemical response in this process. These compounds are one of the mechanisms that reduce leaf and water potential in plants. In *Pistacia vera* L. plants colonized by AMF, adaptation components against osmotic stress have increased, thereby developing drought tolerance (Abbaspour et al. 2012).

Mycorrhiza and Drought Tolerance: Physiological and Molecular Perspectives

The primary environmental stress factor with the most significant limiting effect on plant growth, development, and productivity is drought. Drought stress seriously affects plant physiology. It reduces photosynthetic efficiency in plants, disrupts enzyme structure, and causes oxidative damage by increasing the accumulation of reactive oxygen species (ROS). Oxidative damage affects processes that lead to protein denaturation, disruption of carbohydrate and lipid metabolism, damage to the cell membrane, and ultimately cell death (Bahadur et al. 2019). Furthermore, it affects plant growth and metabolism by disrupting the balance of endogenous hormones. AMF develops a response to drought stress by affecting the morphology, physiology, and molecular regulation of host plants through direct and/or indirect interactions. Thanks to symbiosis with AMF, it becomes easier for the plant to cope with the adverse effects of drought. As drought affects AMF diversity, lower AMF diversity is observed in dry soils compared to water-saturated soils. Since the growth and development of AMF, including spore germination, hyphal growth and branching, and secondary spore formation, depends on soil moisture levels, each AMF species exhibits different tolerance to drought. Although AMFs can show resistance to survive in arid soils, their development in the soil and rhizosphere is limited (Zou et al. 2017). AMF are among the main components that enable plants living in desert ecosystems to adapt to desert conditions (Vasar et al. 2021). Some AMF species, such as *Glomus*, can generally live in semi-arid ecosystems and under conditions of low water availability (Omirou et al. 2013, Cheng et al. 2021).

Plants activate their defense systems by inducing antioxidants such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPX), etc., which eliminate the excessive ROS caused by drought stress. AMF contribute to reducing oxidative stress under drought stress by supporting the plant's antioxidant defense systems. When AMF are drawn to the root by strigolactones secreted by the plant, they trigger oxidative metabolism and stimulate hyphal branching and growth. Strigolactone biosynthesis has been shown to increase in lettuce and tomato plants under drought conditions in the presence of *Rhizophagus irregularis*. The expression of the *SlCCD7* gene, which plays a role in strigolactone biosynthesis, is upregulated as drought conditions increase. AMF symbiosis and strigolactones mitigate the adverse effects of drought by regulating plant physiology and development (Bahadur et al. 2019).

Studies have shown that plants colonized by AMF and exposed to drought conditions exhibit decreased levels of hydrogen peroxide and malondialdehyde (MDA) along with increased CAT, SOD, APX, and GPX activities (Amiri et al. 2015, Al-Arjani et al. 2020). AMF affects transmembrane water transport by regulating AQP genes encoding aquaporins, which are water channel proteins found in cell membranes; this is one of the molecular mechanisms by which mycorrhizal fungi increase drought tolerance in plants (Aroca et al. 2009). The expression of PIP (plasma membrane integral protein) genes in *Glycine max* and *Lactuca sativa* plants decreases under adequate soil moisture conditions (Porcel et al. 2006). In contrast, inoculation of plants with AMF has been shown to increase PIP expression in host plants under drought conditions (Zezel et al. 2008; Aroca et al. 2007). The PIP gene family responds differently to various stresses depending on the presence or absence of AMF (Cheng et al. 2021).

Mycorrhiza-Assisted Water Use Efficiency

Water use efficiency (WUE) is a fundamental indicator that expresses the biomass or yield produced per unit of water consumed

by plants. In irrigation-based agricultural systems, particularly in greenhouses and controlled conditions, the concept of irrigation water use efficiency (IWUE) emerges as a more functional measure. IWUE defines the yield obtained per unit of irrigation water applied and directly reflects the effectiveness of water management strategies (Fereres & Soriano, 2007). Increasing both WUE and IWUE under drought conditions is one of the fundamental goals of sustainable agricultural production.

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role in increasing water use efficiency through the symbiotic relationship they establish with plant root systems. The hyphal network formed by AMF in the soil facilitates water transport to the plant through micro-pores that roots cannot directly access, thereby expanding the effective root surface area (Augé, 2001). This allows the plant to maintain its photosynthetic activity and growth while consuming less water, especially under arid and semi-arid conditions where water potential is low. Indeed, numerous studies have shown that stomatal conductance is more balanced and transpiration losses are more effectively controlled in plants inoculated with AMF (Augé et al., 2016). The positive effects of AMF on WUE and IWUE are not limited to physical water uptake. In mycorrhizal plants, the preservation of photosynthetic capacity, increased chlorophyll content, and reduced oxidative damage associated with water stress increase carbon acquisition per unit of water (Bahadur et al., 2019). AMF also contributes to the regulation of stress-related hormones such as abscisic acid (ABA), optimizing stomatal behavior and supporting more efficient water use (Ruiz-Lozano et al., 2012). These mechanisms lead to a marked increase in IWUE, particularly under deficit irrigation practices.

The literature indicates that the effects of AMF applications on IWUE vary across different plant species and irrigation levels. Studies on cereals, legumes, and medicinal-aromatic plants highlight that AMF inoculation increases IWUE under moderate to severe water stress conditions; however, this effect depends on the type of AMF used, the plant genotype, and the severity of the stress (Begum et al., 2019; Tang et al., 2022). This highlights the need for targeted

applications that consider the plant-AMF-irrigation interaction, rather than a "uniform" approach in mycorrhiza-assisted water management strategies. In conclusion, AMF-supported systems increase water use efficiency, allowing acceptable yield levels to be maintained with the same or less amount of irrigation water. This feature makes mycorrhizal applications a crucial component of sustainable agricultural water management in the Mediterranean climate region and semi-arid areas where water resources are increasingly scarce.

Integration of Mycorrhiza into Water Management Practices

The integration of arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) into agricultural production systems offers a biological support mechanism that enhances the effectiveness of water management strategies. However, the ability of AMFs to improve water use efficiency under drought conditions depends on the selection of appropriate inoculation techniques and their correct integration with irrigation practices. Therefore, AMF integration requires not only a biological application but also a systems approach compatible with agricultural planning and water management.

AMF inoculation can be performed using various methods. The most common applications include applying the inoculation to the root zone during planting, coating the roots with a mycorrhizal suspension before seedling planting, and mixing granular or carrier-based inoculations with the soil (Baslam et al., 2011). Spore density, application time, and the carrier material of the inoculation are critical factors determining the success of mycorrhizal colonization and thus its effect on water uptake. It has been reported that early inoculations, especially those performed in greenhouses and under controlled conditions, shape the root architecture of the plant, creating a structure more resistant to drought stress (Begum et al., 2019). Integrating AMF applications with irrigation strategies is crucial for maximizing water conservation. Studies under deficit and insufficient irrigation regimes have shown that mycorrhizal plants can maintain the same yield with less irrigation water, and IWUE

values increase significantly (Fereres and Soriano, 2007; Augé et al., 2016; Gültekin et al., 2025). Drip irrigation systems are particularly compatible with AMF applications because they support hyphae development by providing more stable moisture conditions in the crop root zone. This integration contributes to both more efficient water use and the continuity of mycorrhizal symbiosis.

In terms of field crops, the economic and growth benefits of AMF-assisted water management are attracting increasing attention. Reducing the use of chemical fertilizers and conserving water contributes to reducing the carbon footprint of agriculture while also lowering production costs (FAO, 2017; IPCC, 2022). However, the diversity of different AMF species and the variability in their responses to plant species mean that a "one inoculant for all conditions" approach is not appropriate. Therefore, targeted AMF selections should be made according to climatic conditions, soil characteristics, and irrigation regimes. The integration of AMF into modern water management practices is a powerful biological tool that complements technical irrigation solutions in combating drought. Mycorrhiza-assisted water management should be considered not only as a way to increase yields in the short term, but also as a holistic approach that protects soil health, reduces environmental impacts, and contributes to the development of sustainable agricultural systems in the long term.

Case Studies in Drought-Prone Regions

Experimental studies conducted in drought-prone Mediterranean and semi-arid regions demonstrate that arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) are an effective biological tool in combating water stress in agricultural production. In these regions, limited rainfall, high temperatures, and increased evaporation rates make it difficult for plants to access water and maintain their physiological resilience. Testing AMF applications under these conditions is important for demonstrating the regional validity of mycorrhiza-assisted water management. Studies conducted in countries with Mediterranean climates have reported that AMF

inoculation increases yield and water use efficiency under limited irrigation conditions. For example, a study in Spain showed that photosynthetic activity and biomass production were preserved in vegetable and cereal crops inoculated with mycorrhizal agents, even under insufficient irrigation conditions (Ruiz-Lozano et al., 2012). Similarly, studies in Italy and Greece have highlighted that AMF improves the root-water relationship, making plants more resistant to fluctuations in soil moisture (Chitarra et al., 2016). In semi-arid countries with limited water resources, such as Turkey, studies on AMF applications have increased, especially in recent years. Research on cereals, legumes, and medicinal-aromatic plants has shown that AMF inoculation increases IWUE under low and medium irrigation conditions and significantly reduces yield losses in some species (Ortiz et al., 2015; Begum et al., 2019; Gültekin et al., 2025). Particularly in medicinal plants, it has been reported that secondary metabolite production under water stress is positively influenced by AMF, providing an additional advantage for high-value crops.

Case studies on drought-sensitive plants have also revealed significant performance differences among AMF species. While some *Glomus* species have been reported to support plant growth under severe water stress, others have shown limited or negative effects under the same conditions (Tawaraya, 2003; Augé et al., 2016). These findings suggest that AMF applications should be customized taking into account regional climate conditions, soil characteristics, and plant species. Otherwise, mycorrhizal symbiosis may not provide the expected benefit or may be limited. Overall, these case studies conducted in drought-prone regions demonstrate that AMF-assisted water management is not merely a theoretical approach; when implemented under appropriate conditions and with the correct AMF-plant pairings, it offers a practical and scalable solution. In this context, the widespread adoption of AMF practices in countries located in the Mediterranean climate zone is of strategic importance for both the conservation of water resources and the ensuring of sustainable food production.

Table 1. Mycorrhiza-assisted water use efficiency under drought conditions in Mediterranean countries

Countr y	Crop	AMF Species / Inoculum	Irrigation or Drought Condition	Main Findings Related to WUE / IWUE	Reference
Türkiye	Maize	<i>Glomus</i> spp. (Shubhodaya), <i>Rhizophagus irregularis</i> , <i>Rhizophagus intraradices</i> , <i>Glomus fasciculatum</i> , <i>Glomus iranicum</i>	Three drought levels (%70, %50 and %30 of soil available water content in the 0-60 cm soil profile)	<i>G. iranicum</i> and <i>R. intraradices</i> being the most effective in enhancing drought tolerance and plant productivity.	Gültekin et al., 2025
Türkiye	Pepper	<i>Glomus etunicatum</i> species	Four different irrigation regimes (I25, I50, I75, I100)	I75 irrigation regime gave the best results in terms of both plant growth and fruit properties in all mycorrhizal and non-mycorrhizal plants.	Ulukapı et al., 2020
Iran	Potato	<i>Claroidoglomus etunicatum</i> and <i>Rhizophagus intraradices</i>	Evaporation levels from a Class A pan (60, 90, 120, and 150 mm) to simulate drought stress	Inoculation with <i>R. intraradices</i> increased tuber yield by 36.00–32.48% compared with non-inoculated control plants	Khosravifar et al., 2020

Iran	Sesame	Funneliformis and Rhizoglossus	Irrigation based on 100% water requirement (normal irrigation), providing 70% of the plant's water requirement (mild stress) and providing 50% of the plant's water requirement (severe stress).	mycorrhizal symbiosis improved all measured traits, including grain yield, biological yield, and water use efficiency (WUE)	Askari et al., 2019
Italy	Melon	Rhizophagus irregularis and Funneliformis mosseae	60%, 80%, or 100% of crop evapotranspiration	moderate deficit irrigation (80%) and AMF inoculation allows for water savings without reducing fruit yield, and improves irrigation water use efficiency	Miceli et al., 2023
Spain	Tomato	Rhizoglossus irregularis	optimal irrigation with 100% of the crop daily evapotranspiration (Etc), deficit irrigation with 75% of the optimal treatment, and the usual irrigation adopted at the farm	Mycorrhizal-inoculated plants sustained yield levels with reduced fertigation.	Biel et al., 2021

The studies summarized in Table 1 clearly demonstrate that arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) make significant contributions

to agricultural production under water scarcity and drought conditions in countries located in the Mediterranean climate zone. In particular, in systems with limited irrigation and rainfall dependence, mycorrhizal plants have been reported to maintain higher photosynthetic activity, improve stomatal regulation, and stabilize plant water status. However, the results obtained may vary depending on the AMF species, plant genotype, and stress severity; this highlights the need to develop region- and crop-specific strategies in mycorrhiza-assisted water management applications.

Limitations and Future Research Directions

Although the potential of AMFs to improve water use efficiency under drought conditions has been strongly demonstrated in the literature, current studies have significant limitations. First, most research has been conducted under controlled conditions such as greenhouse or pot trials. While such studies are valuable for understanding the mechanisms, they do not fully reflect soil heterogeneity, microbial competition, climate variability, and long-term stress dynamics in field conditions (Augé et al., 2016). Therefore, direct generalization of positive results obtained under greenhouse conditions to the field scale is limited. Another significant limitation is the high functional variability among AMF species and isolates. Although *Glomus* or *Rhizophagus* species are often discussed under a general heading in the literature, it is known that the effects of different species and isolates within the same genus on plant performance under drought conditions can vary significantly (Tawaraya, 2003; Begum et al., 2019; Gültekin et al., 2025). This can lead to the mycorrhizal system failing to provide the expected benefit or, in some cases, even having a negative lifespan. That's why, instead of a "universal" AMF solution, the addition of targeted inoculants specific to the plant species, soil characteristics, and climatic conditions is necessary. Furthermore, many assessments of water use efficiency were conducted using short-term measurements; the long-term consequences of AMF, particularly its contributions to soil health, carbon characteristics, and microbial particle structures, are not adequately addressed. The scarcity of

long-term field trials makes it difficult to summarize and assess the sustainability and economic feasibility of AMF-supported water management outcomes. Similarly, the synergistic or antagonistic effects of interactions between AMF and other beneficial organisms (PGPR, *Trichoderma* spp.) under water stress conditions are not yet sufficiently elucidated.

In the future, progress should be made in several key areas to overcome these limitations. First, long-term, multi-location field trials should be conducted in Mediterranean and semi-arid regimes; the performance of AMF applications under different irrigation regimes should be tested under real production conditions. Second, more detailed information should be revealed about the effects of AMF, as a complementary and supportive element, on water uptake, hormone regulation, and stress-enriched gene expression in plants (Tang et al., 2022). Finally, research should focus on water management, management policies, and climate-friendly agriculture recommendations in conjunction with different climate scenarios.

Conclusions and Practical Implications

The findings of this study demonstrate that arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are an effective biological tool for improving plant-soil-water interaction and increasing water use efficiency (WUE) in irrigation-based systems, particularly under drought conditions. Studies in the Mediterranean climate zone and semi-arid regions consistently show that AMF inoculation contributes to the preservation of photosynthetic capacity, stabilization of plant water status, and reduction of yield losses under limited water conditions. These effects are related not only to AMF increasing root access to water but also to its regulation of physiological mechanisms associated with stomatal regulation, hormonal balance, and stress tolerance. The use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) offers a significant advantage in water-scarce regions by enabling the maintenance of acceptable yield levels with the same or less irrigation water. This is particularly noteworthy for reducing production costs and environmental

footprint for water-dependent and economically valuable crops (medicinal and aromatic plants, vegetables, and specialty cereals). However, the practical success of AMF applications depends on selecting the correct AMF strain, applying the appropriate inoculation technique, and developing an agricultural plan compatible with the irrigation regime. In this context, the use of local AMF isolates and the development of farmer-scale viable inoculants are critical for the widespread adoption of mycorrhiza-supported systems.

In conclusion, mycorrhiza-assisted water management is not merely a technique for short-term yield increases in combating climate change and agricultural drought; it is also a holistic approach that protects soil health, supports the sustainable use of water resources, and contributes to long-term food security. Supported by strong collaboration among researchers, practitioners, and policymakers, integrating this approach with climate-friendly agricultural policies is considered a strategic requirement for the future of sustainable agricultural production in the Mediterranean and semi-arid regions.

References

- Abbaspour, H., S. Saeidi-Sar, H. Afshari, and M. Abdel-Wahhab. 2012. Tolerance of mycorrhiza infected pistachio (*Pistacia vera* L.) seedling to drought stress under glasshouse conditions. *J. Plant Physiol.* 169, 704-709. Doi: 10.1016/j.jplph.2012.01.014
- Abdalla, M., Bitterlich, M., Jansa, J., Püschel, D., & Ahmed, M. A. (2023). The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in improving plant water status under drought. *Journal of Experimental Botany*, 74(16), 4808-4824. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad249>
- Al-Arjani, A. B. F., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi modulates dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in *Ephedra foliata* Boiss. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1), 380-394.
- Amiri, R., Nikbakht, A., & Etemadi, N. (2015). Alleviation of drought stress on rose geranium [*Pelargonium graveolens* (L.) Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. *Scientia Horticulturae*, 197, 373-380.
- Aroca, R., Bago, A., Sutka, M., Paz, JA, Cano, C., Amodeo, G., vd. (2009). Tanımlanan ilk arbusküler mikorizal mantar aquaporininin ekspresyon analizi, tuz stresi altındaki ve olmayan miselyum arasında eş zamanlı gen ekspresyonunu ortaya koymaktadır. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 22, 1169–1178. doi: 10.1094/MPMI-22-9-116.
- Askari, A., Ardakani, M. R., Paknejad, F., & Hosseini, Y. (2019). Effects of mycorrhizal symbiosis and seed priming on yield and water use efficiency of sesame under drought stress condition. *Scientia Horticulturae*, 257, 108749. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108749>

Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular–arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>

Augé, R. M., Toler, H. D., & Saxton, A. M. (2016). Mycorrhizal stimulation of leaf gas exchange in relation to root colonization, shoot size, leaf phosphorus and nitrogen: a quantitative analysis of the literature using meta-regression. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1084. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01084>

Bahadur, A., Batool, A., Nasir, F., Jiang, S., Mingsen, Q., Zhang, Q., ... & Feng, H. (2019). Mechanistic insights into arbuscular mycorrhizal fungi-mediated drought stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 20(17), 4199. <https://doi.org/10.3390/ijms20174199>

Baslam, M., Garmendia, I., & Goicoechea, N. (2011). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved growth and nutritional quality of greenhouse-grown lettuce. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(10), 5504–5515. <https://doi.org/10.1021/jf200501c>

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>

Biel, C., Camprubí, A., Lovato, P. E., & Calvet, C. (2021). On-farm reduced irrigation and fertilizer doses, and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation improve water productivity in tomato production. *Scientia Horticulturae*, 288, 110337. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110337>

Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., Dutta, S., Choudhury, M. R., Giri, A., ... & Paul, D. (2025). Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production—A critical

review of the impacts and adaptation strategies. Cambridge Prisms: Water, 3, e4. <https://doi.org/10.1017/wat.2024.16>

Boyno, G., Rezaee Danesh, Y., Çevik, R., Teniz, N., Demir, S., Durak, E. D., ... & Mulet, J. M. (2025). Synergistic benefits of AMF: development of sustainable plant defense system. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1551956.

Chandrasekaran, M. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced biomass, root morphological traits and nutrient uptake under drought stress: a meta-analysis. *Journal of Fungi*, 8(7), 660. <https://doi.org/10.3390/jof8070660>

Cheng, S., Zou, Y. N., Kuča, K., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Wu, Q. S. (2021). Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Frontiers in Microbiology*, 12, 809473.

Chitarra, W., Pagliarani, C., Maserti, B., Lumini, E., Siciliano, I., Cascone, P., Schubert, A., Gambino, G., & Balestrini, R. (2016). Insights on the impact of arbuscular mycorrhizal symbiosis on tomato tolerance to water stress. *Plant Physiology*, 171(2), 1009–1023. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00307>

Çetin, M., Yıldız, S., & Beyhan, S. (2021). Water Need Models and Irrigation Decision Systems. arXiv preprint arXiv:2103.11133. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.11133>

FAO. (2012). Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 978-92-5-107304-9

FAO. (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, Available online: <https://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>

FAO. The State of Food and Agriculture (2020). In Overcoming Water Challenges in Agriculture; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>

Fernández-Lizarazo, J. C., & Moreno-Fonseca, L. P. (2016). Mechanisms for tolerance to water-deficit stress in plants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomía Colombiana*, 34(2), 179-189.

Gültekin, R., Görgişen, C., Yeter T., Sagun, Ç, & Avağ, K. (2025). Mycorrhizal Influence on Irrigation Efficiency: A Study of Maize under Drought Conditions. *Current Applied Science And Technology*, 26(1), e0265765. <https://doi.org/10.55003/cast.2025.265765>

Halder, M., Dhar, P. P., Mujib, A. S. M., Khan, M. S., and Akhter, S. (2015). Effect of arbuscular mycorrhiza fungi inoculation on growth and up take of mineral nutrition in *Ipomoea aquatica*. *Curr. World Environ.* 10, 67–75. doi: 10.12944/CWE.10.1.08

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Khosravifar, S., Farahvash, F., Aliasgharzad, N., Yarnia, M., & Khoei, F. R. (2020). Effects of different irrigation regimes and two arbuscular mycorrhizal fungi on some physiological characteristics

and yield of potato under field conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43(13), 2067–2079.

<https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1758133>

Miceli, A., Vetrano, F., Torta, L., Esposito, A., & Moncada, A. (2023). Effect of Mycorrhizal Inoculation on Melon Plants under Deficit Irrigation Regimes. *Agronomy*, 13(2), 440.

<https://doi.org/10.3390/agronomy13020440>

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

Omirou, M., Ioannides, I. M., & Ehalotis, C. (2013). Mycorrhizal inoculation affects arbuscular mycorrhizal diversity in watermelon roots, but leads to improved colonization and plant response under water stress only. *Applied soil ecology*, 63, 112–119.

Ortiz, N., Armada, E., Duque, E., Roldán, A., & Azcón, R. (2015). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural soil conditions: effectiveness of autochthonous or allochthonous strains. *Journal of plant physiology*, 174, 87–96.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.08.019>

Porcel, R., Aroca, R., Azcón, R., and Ruiz-Lozano, J. M. (2006). *PIP* aquaporin gene expression in arbuscular mycorrhizal *Glycine max* and *Lactuca sativa* plants in relation to drought stress tolerance. *Plant Mol. Biol.* 60, 389–404. doi: 10.1007/s11103-005-4210-y

Redecker, D., Kodner, R., & Graham, L. E. (2000). Glomalean fungi from the Ordovician. *science*, 289(5486), 1920–1921.

Remy, W., Taylor, T. N., Hass, H., & Kerp, H. (1994). Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(25), 11841–11843.

Ruiz-Lozano, J. M., Porcel, R., Azcon, C., & Aroca, R. (2012). Regulation by arbuscular mycorrhizae of the integrated physiological response to salinity in plants: new challenges in physiological and molecular studies. *Journal of Experimental Botany*, 63(11), 4033-4044. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers126>

Salman, M. (2016). Coping with Water Scarcity-The Role of Agriculture. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5400e>

Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisinigh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>

Tang, H., Hassan, M. U., Feng, L., Nawaz, M., Shah, A. N., Qari, S. H., ... and Miao, J. (2022). The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. *Frontiers in Plant Science*, 13, 919166. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>

Tawaraya, K. (2003). Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars. *Soil Science and Plant Nutrition*, 49(5), 655–668. <https://doi.org/10.1080/00380768.2003.10410323>

Ulukapı, K., Kurt, Z., & Sener, S. (2020). Su Kısıtı Koşullarında Biber (*Capsicum annuum* L.) Bitkisinde Mikoriza Uygulamasının Vejetatif ve Generatif Gelişme Üzerinde Etkileri. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(4), 927-931. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i4.927-931.3104>

Vasar, M., Davison, J., Sepp, S. K., Opik, M., Moora, M., Koorem, K., et al. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungal communities in the soils of desert habitats. *Microorganisms* 9:229. doi: 10.3390/microorganisms9020229

Waters, M. T., Gutjahr, C., Bennett, T., & Nelson, D. C. (2017). Strigolactone signaling and evolution. *Annual review of plant biology*, 68(1), 291-322.

Wu, Q. S., and Zou, Y. N. (2017). “Arbuscular mycorrhizal fungi and tolerance of drought stress in plants,” in *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants*, ed. Q. S. Wu (Singapore: Springer), 25–41. doi: 10.1007/978-981-10-4115-0_8

Xu, L., Li, T., Wu, Z., Feng, H., Yu, M., Zhang, X., & Chen, B. (2018). Arbuscular mycorrhiza enhances drought tolerance of tomato plants by regulating the 14-3-3 genes in the ABA signaling pathway. *Applied Soil Ecology*, 125, 213-221.

Zézél, A., Brou, Y. C., Meddich, A., and Marty, F. (2008). Molecular identification of MIP genes expressed in the roots of an arbuscular mycorrhizal *Trifolium alexandrium* L. under water stress. *Afr. J. Agric. Res.* 3, 78–83. doi: 10.1021/jf072612

Zou, Y. N., Wang, P., Liu, C. Y., Ni, Q. D., Zhan, D. J., and Wu, Q. S. (2017). Mycorrhizal trifoliolate orange has greater root adaptation of morphology and phytohormones in response to drought stress. *Sci. Rep.* 7:41134. doi: 10.1038/srep41134

BÖLÜM 3

GOOGLE EARTH ENGINE TABANLI UZAKTAN ALGILAMA YAKLAŞIMIYLA ANTALYA'DAKİ ÖRTÜ ALTI TARIM ALANLARINDA YÜZEY SICAKLIĞI VE HAVA KİRLETİCİ GAZLAR ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ANALİZİ

ESRA TAN YÜCESOY¹

NAMIK KEMAL SÖNMEZ²

BATUHAN KARTAL³

Giriş

Dünya genelinde artan enerji kullanımı, tarımsal üretim uygulamaları, ulaşım faaliyetleri ve arazi kullanımındaki değişimler, kirleticilerin mekânsal dağılımını şekillendiren başlıca faktörlerdir (WHO, 2023). Bilindiği üzere hava kirliliği, atmosferdeki gaz ve partikül seviyelerinin doğal sınırların üzerine çıkarak ekosistemler, insan sağlığı ve bölgesel iklim üzerinde olumsuz etkiler oluşturmasıyla ortaya çıkan karmaşık bir çevresel problemdir. Atmosferde yaygın olarak izlenen azot dioksit (NO₂),

¹ Lisans öğrenci, Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzak Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü. ORCID: 0009-0007-1344-9770

² Prof. Dr., Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Uzak Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü. ORCID: 0000-0001-6882-0599

³ Msc, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzak Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü (YL). ORCID: 0009-0009-0066-6842

karbonmonoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), ozon (O₃) ve formaldehit (HCHO) gibi bileşikler hava kalitesini doğrudan etkileyen ve küresel ısınma sürecine katkı sağlayabilen temel gazlardır. İnsan kaynaklı hava kirliliğinin temel göstergeleri arasında yer alan azot dioksit (NO₂), çoğunlukla motorlu taşıtlardan enerji üretim sistemlerine kadar pek çok yanma sürecinin ürünü olup özellikle kış aylarında ısınma amaçlı enerji tüketiminin artmasıyla atmosferde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabilmektedir (EPA, 2022). SO₂ ise, kükürt içeren yakıtların yanması sonucunda ortaya çıkmakta ve hem insan sağlığında hem de tarımsal ürünlerde hassas dokular üzerinde zararlı etkiler oluşturabilmektedir (WHO, 2023). Bir diğer gaz olan CO, eksik yanma süreçlerinin karakteristik bir ürünü olup özellikle verimi düşük bireysel ısıtma sistemlerinde ve tarımsal seralarda kullanılan yakıt türlerine bağlı olarak artış gösterebilmektedir (García & Pardo, 2016:246). Bu üç kirleticinin enerji kullanımındaki mevsimsel değişimlere ve bölgesel faaliyet yoğunluğuna duyarlı olması, onları yerel hava kalitesinin değerlendirilmesinde kritik önem taşıyan parametreler hâline getirmektedir.

Ülkemizde söz konusu bu gazların dağılımı yalnızca şehirleşme ve sanayileşmenin yoğun olduğu bölgelerde değil, aynı zamanda tarımsal faaliyetlerin baskın olduğu bölgelerde de belirgin biçimde farklılaşmaktadır. Tarım alanlarında hava kirleticilerinin değerlendirilmesinde çevresel koşullar, üretim yapısı ve enerji kullanım davranışlarının birlikte ele alınması çok boyutlu bir süreç olup oldukça önemlidir (Müller & ark., 2022:88).

Önemli bir tarımsal üretim modeli olan örtü altı üretim ortamlarının, atmosferde gaz birikimini doğrudan artırıcı bir etkisi bulunmamaktadır. Bununla birlikte örtü altı üretim alanlarındaki atmosferik gaz yoğunlukları, seranın fiziksel yapısından çok bölgedeki enerji kullanım miktarı ve üretim dönemleriyle ilişkilidir. Özellikle kış aylarında örtü altı üretim modellerinin atmosferdeki

gaz birikimine etkisi oldukça etkili olabilmektedir. García & ark. (2021:246) İspanya'nın Almería bölgesinde gerçekleştirdikleri bir çalışmada, kış aylarında seraların ısıtılmasında kullanılan yakıtların atmosferdeki (NO_2) gibi bazı gazların değerlerinde belirgin artışlara yol açtığını bildirmiştir. Bu kapsamda Ülkemizdeki örtü altı üretim alanlarının yoğun olduğu bölgelerde, yeterli ısının sağlanabilmesi ve özellikle çok soğuk dönemlerde don zararının önlenmesi amacı ile belirli aylarda gerçekleştirilen yakıt kullanımındaki önemli artışların, özellikle kış aylarında bu alanların hava kalitesini doğrudan etkileyen NO_2 , CO ve SO_2 gibi gazların seviyelerinde farklılaşmaların olabileceğini göstermektedir.

Hava kirleticilerinin geniş alanlarda düzenli ve karşılaştırılabilir biçimde izlenebilmesi, günümüzde uzaktan algılama tekniklerini önemli bir araştırma aracı hâline getirmiştir. Bu sistem atmosferdeki gaz moleküllerinin ve arazi yüzey özelliklerinin uydular tarafından belirlenmesine dayanır ve özellikle geniş coğrafi bölgelerde kirletici dağılımlarının zamansal ve mekânsal dağılımlarının incelenmesine imkân tanımaktadır (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2021:768).

Atmosferik kirletici gazların izlenmesinde yaygın olarak kullanılan Sentinel-5P uydusundaki TROPOMI sensörü, NO_2 , SO_2 , CO, O_3 ve HCHO gibi atmosferik bileşenlere ait seviye-2 kolon yoğunluk verileri üretmekte ve tarım alanlarındaki kirleticilerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Karimi & ark. (2022:806) tarafından yürütülen bir çalışmada, TROPOMI sensörü kullanılarak tarımsal faaliyetlere bağlı yakıt tüketiminin mevsimsel olarak atmosferdeki NO_2 ve SO_2 düzeylerinde artışa neden olduğu ortaya konulmuştur.

Uzaktan algılama teknolojisi ile arazi yüzey sıcaklığının değerlendirilmesinde ise yaygın olarak MODIS LST verileri kullanılmaktadır. Söz konusu bu veriler, örtü altı tarım alanlarında oluşan termal etkilerin analizinde önemli bir veri kaynağıdır.

MODIS LST verileri, yer yüzeylerinin gündüz ısınma ve gece soğuma davranışlarına dayalı olarak termal yayılım ölçümleri üretmektedir. Böylelikle yeryüzü sıcaklık değişimlerinin izlenmesinde güvenilir bir veri kaynağıdır (Wan, 2014:36).

Sentinel-5P uydusundaki TROPOMI sensörü ile NO₂, SO₂, CO, O₃ ve HCHO gibi atmosferik gazların yoğunluğunun belirlenmesi, MODIS LST verileri ile söz konusu bu alanlardaki yüzey sıcaklıklarının ortaya konulması sayesinde yüzey sıcaklığı ile atmosferik gaz yoğunluğu arasındaki ilişkilerin detaylandırılması mümkün olabilmektedir. Araştırmacılar tarafından yürütülen bazı çalışmalarda, arazi yüzey sıcaklığındaki artış ile kirletici gazların yoğunluklarının değişimi arasında önemli ilişkilerin olduğu ortaya konulmuştur. Zhang & ark. (2020:4467), yüzey sıcaklık artışının O₃ ve HCHO gibi sıcaklığa duyarlı gazların fotokimyasal reaksiyon hızlarını artırarak daha yüksek yoğunluklara yol açtığını rapor etmiştir. Türkiye’de yapılan çalışmalarda da benzer bulgulara ulaşılmıştır. Örneğin, Yılmaz & ark. (2021:1), Antalya ve Mersin’deki yoğun örtü altı tarım alanlarının çevresine kıyasla daha yüksek yüzey sıcaklığına sahip olduğunu belirtmiş ve bu sıcaklık farklarının atmosferik gazların davranışını etkileyebildiğini ifade etmiştir. Demir (2018:45), Antalya’nın Kumluca, Aksu ve Serik bölgelerinde yaz aylarında artan sıcaklığın gazların atmosferde kalış süresi ve yoğunluğu üzerinde belirleyici bir rol oynadığını belirtmiştir.

Bu çalışma kapsamında, Antalya’da örtü altı tarımın yoğun olduğu alanlarda kış döneminde yakıt kullanımının artması nedeni ile, NO₂, CO ve SO₂ seviyelerinde mevsimsel yükselişlere yol açabileceği varsayımından yola çıkılarak, alanın hem bölgesel hava kalitesinin değerlendirilmesinde ve hem de tarımsal üretim faaliyetlerinin atmosferik bileşenlerle ilişkisini anlamada bu gazların ayrıntılı biçimde incelenmesine karar verilmiştir. Çalışmada, Google Earth Engine (GEE) ortamı kullanılarak 2022-2024 yılları arasında

yoğun örtü altı tarımsal üretimim yapıldığı alanlar Sentinel-5P TROPOMI ve MODIS LST verileri birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda Antalya ilinin örtü altı üretim modeli açısından öne çıkan Aksu, Serik, Kumluca, Gazipaşa ve Kepez–Varsak ilçelerinde NO₂, CO ve SO₂ konsantrasyonlarının yüzey sıcaklığı ile ilişkileri incelenmiştir. Böylece örtü altı tarım faaliyetlerinden kaynaklanan yüzey sıcaklık düzeyi ile atmosferik kirleticilerin değişimi arasındaki bağlantının uzaktan algılama temelli yöntemlerle ortaya konulması ve Antalya’daki örtü altı üretim bölgelerine özgü atmosferik davranışların literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

Materyal ve Yöntem

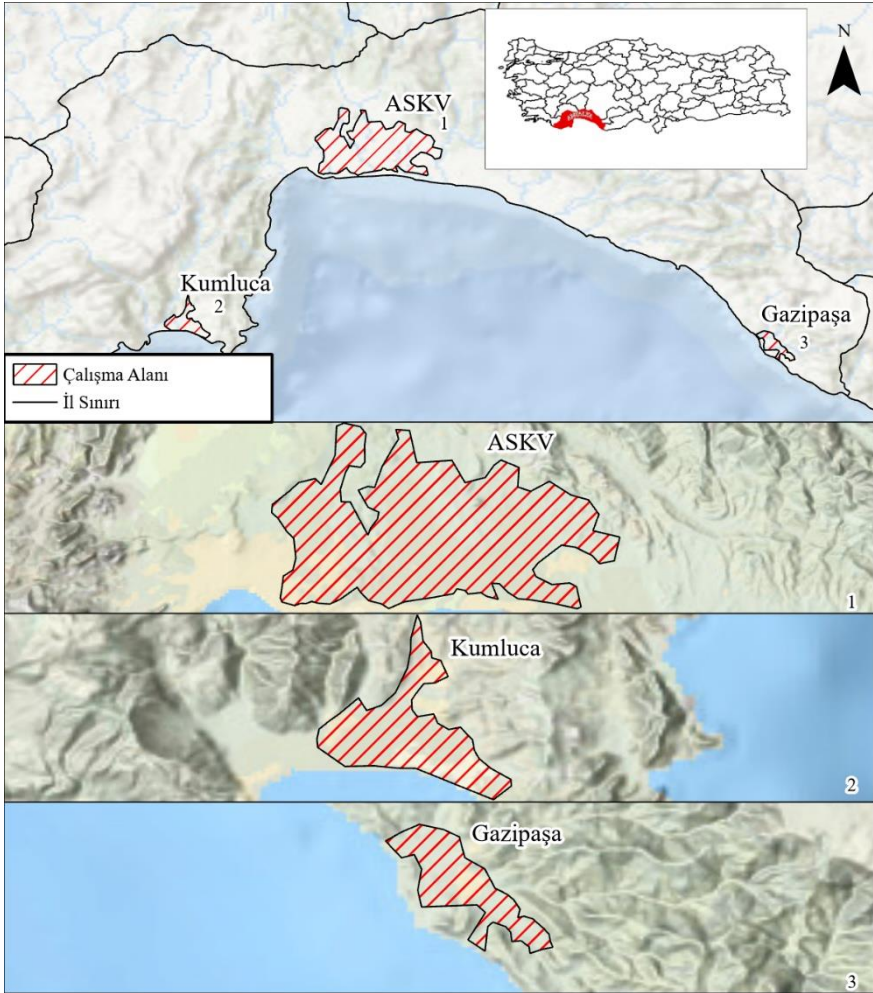
Çalışma Alanı

Antalya ili yaklaşık 2,7 milyon nüfusu, geniş tarım alanları ve iklimsel özellikleriyle Akdeniz Bölgesi’nin önemli tarımsal üretim merkezlerinden birisidir. İlde hâkim olan Akdeniz iklimi, yazları sıcak ve kurak kışları ılıman ve yağışlıdır. Yıllık ortalama sıcaklık 18–20°C olup, yaz aylarında en yüksek 40°C’nin üzerine çıkabilmekte, kış aylarında ise kıyı kesimlerinde en düşük 5–8°C seviyelerine inmektedir.

Çalışma alanı, Türkiye’nin Akdeniz kıyısında yer alan ve 36°07’–37°29’ kuzey enlemleri ile 29°20’–32°35’ doğu boylamları arasında konumlanan Antalya ili sınırlarını kapsamakta olup, bölgenin yoğun örtü altı tarımsal üretim modeline sahip olan Aksu, Serik, Kumluca, Gazipaşa ve Kepez (Varsak) bölgelerinde yoğunlaşan örtü altı üretim alanlarında yürütülmüştür. Çalışmanın yürütüldüğü Aksu ve Serik ovaları örtü altı sebze üretiminin yoğun olduğu verimli alanlardır. İlin batısında yer alan Kumluca ilçesi ise kıyıya yakın konumu ve sıcaklığı nedeni ile seracılığın çok yoğun bir şekilde yürütüldüğü bir bölgedir. Gazipaşa ilçesi Antalya ilinin en doğusunda yer almakta olup, özellikle örtü altı muz üretiminin gerçekleştirildiği nadir ilçelerden birisidir. Kepez/Varsak ilçeleri ise

daha iç kesimdedir ve yoğun örtü altı süs bitkileri ve sebzeçiliğin yapıldığı önemli üretim bölgesidir. Söz konusu bu alanlarda örtü altı tarım faaliyetlerinin yoğun olması, çalışmada incelenen NO₂, CO ve SO₂ gibi atmosferik bileşenlerin bölgesel dağılımının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Şekil 1. Çalışma Alanı



Şekil 1'den de görüleceği üzere, Antalya'nın topografyası kıyı kesimlerinde geniş ovalar, iç kesimlere doğru ise yükselen

dağlık alanlarla temsil edilmektedir. Bu kuzey–güney yönlü yükselti değişimi, sıcaklık ve nem açısından kısa mesafelerde farklılıklar oluşmasına yol açmakta; jeolojik yapı ise kıyıda genç alüvyal birikimler, iç kesimlerde ise daha eski kayaların görüldüğü bir dağılım sergilemektedir. Çalışmada ele alınan her bölge sahip olduğu konum ve doğal yapı doğrultusunda kendi içinde değerlendirilmiş ve sıcaklık–hava bileşeni ilişkileri bu özellikler dikkate alınarak incelenmiştir. Bu özellikler Antalya’yı, sera alanlarının yoğunluğu ve sıcaklık değişimlerinin belirginliği nedeniyle atmosferik bileşenlerin mekânsal dağılımının araştırılması için uygun bir çalışma alanı hâline getirmektedir.

Materyal

Çalışmada atmosferik kirleticilerin değerlendirilmesi amacı ile, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 2017 yılında fırlatılan Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) uydusunda bulunan TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) sensörüne ait günlük ürünler materyal olarak kullanılmıştır. TROPOMI, morötesi (UV), görünür (VIS), yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantlarında ölçüm yapabilen geniş spektral kapsama sahip olup troposferdeki NO₂, CO ve SO₂ gibi gaz bileşenlerini yüksek hassasiyetle tespit edebilmektedir (Veefkind & ark., 2012:70). Yaklaşık 3.5 × 5.5 km mekânsal çözünürlüğe sahip veri yapısı, özellikle tarımsal üretimin yoğun olduğu alanlarda kirletici dağılımlarının mekânsal örüntülerinin izlenmesine olanak tanımaktadır. Sensörün günlük veri üretimi sayesinde çalışma alanındaki kirletici değişimlerinin dönemsel olarak takip edilmesi mümkün olabilmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. Sentinel 5P / TROPOMI Uydusu Özellikleri

Bant Grubu	Spektral Aralık (nm)	Mekânsal Çözünürlük (Seviye-3)	Zamansal Çözünürlük
UV	270 – 320	1x1 km	Günlük (1 gün)

VIS	320 – 500	1x1 km	Günlük (1 gün)
NIR	675 – 775	1x1 km	Günlük (1 gün)
SWIR	2305 – 2385	1x1km	Günlük (1 gün)

Kaynak: European Space Agency [ESA], n.d.

Yüzey sıcaklığının değerlendirilmesinde ise, NASA'nın Terra ve Aqua uydularında bulunan MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensörüne ait 8 günlük kompozit Land Surface Temperature (LST) ürünleri materyal olarak kullanılmıştır (Tablo 2). MODIS, termal kızılötesi bantları aracılığıyla kara yüzey sıcaklığını hesaplayan ve düzenli veri üretimi sayesinde örtü altı tarım alanlarındaki sıcaklık farklılıklarının belirlenmesinde yaygın biçimde kullanılan güvenilir bir sensördür (Wan, 2014:36).

Tablo 2. Modis Uydusu LST Bant Yapısı ve Özellikleri

Bant	Spektral Aralık (µm)	Kullanım Amacı	Mekansal Çözünürlük	Zamansal Çözünürlük
Band 31	10.78–11.28	LST hesaplaması	1 km	8 günlük kompozit
Band 32	11.77– 2.27	Emissivite+LST doğrulama	1 km	8 günlük kompozit

Kaynak: National Aeronautics and Space Administration [NASA], n.d

Çalışmada ayrıca, alanın sınırlarının belirlenmesi, uydu verileriyle konumsal uyumunun sağlanması gibi işlem aşamalarında materyal olarak QGIS (Quantum GIS) yazılımından yararlanılmıştır.

Yöntem

Çalışmanın ilk aşamasında materyal olarak kullanılan uydu verileri, Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden temin edilerek işlenmiştir. GEE'nin bulut tabanlı hesaplama altyapısı sayesinde, Sentinel-5P ve MODIS veri arşivlerine hızlı erişim sağlanmış, alanda belirlenen örtü altı üretim alanlarının seçilmesine, maskeleme işlemlerinin uygulanmasına ve analiz süreçlerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde yürütülmesine olanak tanımıştır (Gorelick & ark., 2017:18). Diğer aşamalarda yürütülen analizler, QGIS ve Google Earth Engine (GEE) platformları birlikte kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın yöntemsel süreci aşağıdaki işlem aşamalarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışma Alanının Belirlenmesi

Çalışma alanı, Antalya ilinde örtü altı tarım faaliyetlerinin yoğun olarak gerçekleştirildiği bölgeleri temsil eden Aksu, Serik, Gazipaşa, Kumluca ve Kepez/Varsak ilçelerinde belirlenmiştir. Bu kapsamda sera yoğunluğunun yüksek olduğu alanlar, QGIS yazılımı kullanılarak tanımlanmış ve WGS 84 referans sistemine göre mekânsal sınırlar oluşturulmuştur. Belirlenen sera alanları daha sonra Google Earth Engine'e aktarılmıştır. Ayrıca, GEE üzerinde aylık ortalama değerlerin üretilmesi amacıyla yoğun örtü altı üretim alanları değerlendirmeye alınmıştır. Bu yöntem, farklı sera bölgelerinin genel mekânsal özelliklerinin kıyaslanmasına olanak sağlamıştır.

Atmosferik Kirleticiler Verilerinin Temini ve İşlenmesi

Çalışmada atmosferik kirleticilerin analizinde Sentinel-5P/TROPOMI uydusuna ait OFFL Level-3 verilerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda çalışmada NO₂, SO₂ ve CO gazları değerlendirilmiştir. Ayrıca Sentinel-5P verilerinin ölçüm kalitesini artırmak amacıyla, bulutluluk etkisini azaltmaya yönelik olarak %20 bulut filtresi uygulanmıştır.

Veri temin aşamasında her bir gaz için günlük ölçümler alınmış olup daha sonrasında bu verilerden aylık ortalama değerler hesaplanmıştır. Analizler 2022–2024 yılları arasındaki dönemi kapsamakta olup, her ay için ilgili gazlara ait ortalama kolon yoğunlukları elde edilmiştir. Bu zaman aralığının belirlenmesinde, bölgesel ölçekte olağanüstü atmosferik olayların bulunmaması ve TROPOMI verilerinin 2019 sonrası gelişmiş işleme algoritmalarına sahip olması etkili olmuştur. Bu yöntem, kısa süreli atmosferik dalgalanmaların etkisini azaltarak daha kararlı zamansal eğilimlerin ortaya konulmasını sağlamıştır.

Yüzey Sıcaklığı (LST) Verilerinin İşlenmesi

Yüzey sıcaklığı analizlerinde, MODIS sensörüne ait gündüz (LST Day) ve gece (LST Night) yüzey sıcaklığı bantları kullanılmıştır. MODIS LST verileri Google Earth Engine ortamında işlenmiş ve başlangıçta Kelvin (K) biriminde sağlanan sıcaklık değerleri Santigrat (°C) birimine dönüştürülmüştür. Daha sonrasında, örtü altı alanlarına ait her ay için elde edilen gündüz ve gece sıcaklık bantlarının ortalaması alınarak ortalama yüzey sıcaklığı (LST_avg) değerleri hesaplanmıştır. Aykırı sıcaklık değerlerinin analiz sonuçlarını etkilemesini önlemek amacıyla, -50 °C ile +65 °C aralığı dışında kalan değerler eşikleme yöntemiyle maskelenmiştir. Bu işlem ile, fiziksel olarak gerçekçi olmayan sıcaklık değerlerinin veri setinden çıkarılması sağlanmıştır.

Zamansal Ortalama Hesaplamaları ve Veri Dışa Aktarımı

Bu işlem aşamasında, Sentinel-5P ve MODIS verileri tanımlanan sera alanları üzerinden filtrelenmiş ve her bir sera bölgesi için aylık ortalama gaz ve sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen aylık ortalama değerler, her sera alanı için ayrı ayrı olacak şekilde CSV formatında dışa aktarılmıştır. Böylelikle çalışma alanında 2022–2024 yılları boyunca her ay için CO, SO₂, NO₂ ve LST_avg değişkenlerine ait zaman serileri oluşturulmuştur.

İstatistiksel Analizler

Her bir sera alanı için ayrı ayrı olacak şekilde CSV formatında dışa aktarılan veriler daha sonrasında, excel yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Excel ortamına aktarılan veri setlerinde, her bir gaz için zamansal değişim analizleri, sera alanları arasındaki mekânsal karşılaştırmalar ve yüzey sıcaklığı ile atmosferik kirleticiler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla korelasyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz aşamasında değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirlemek amacıyla Pearson korelasyon katsayısı (r) kullanılmıştır. Pearson korelasyon katsayısı, iki sürekli değişken arasındaki doğrusal ilişkinin derecesini ölçmekte olup -1 ile $+1$ arasında değer almaktadır. Katsayının pozitif değerler alması değişkenler arasında pozitif yönlü bir ilişkiyi, negatif değerler alması ise negatif yönlü bir ilişkiyi ifade etmektedir. Katsayının mutlak değerinin 0 'a yaklaşması ilişkinin zayıf olduğunu, 1 'e yaklaşması ise güçlü bir doğrusal ilişki bulunduğunu göstermektedir. Bu kapsamda çalışmadan elde edilen korelasyon katsayıları, değişkenler arasındaki ilişkinin yönü ve şiddeti dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Field, 2018:952; Rodgers & Nicewander, 1988:59).

Genel Değerlendirme

Çalışmanın son aşamasında ise, metodolojik bir yaklaşım ile sera alanlarındaki yüzey sıcaklığı ve atmosferik kirleticilerin zamansal ve mekânsal değişimleri, bütüncül bir çerçevede değerlendirmeye alınmıştır. Özellikle çalışmada aylık ortalama temeline dayalı analizler sayesinde, kısa süreli dalgalanmaların etkisi azaltılmış ve sera alanlarına özgü genel eğilimlerin daha net biçimde ortaya konulması sağlanmıştır.

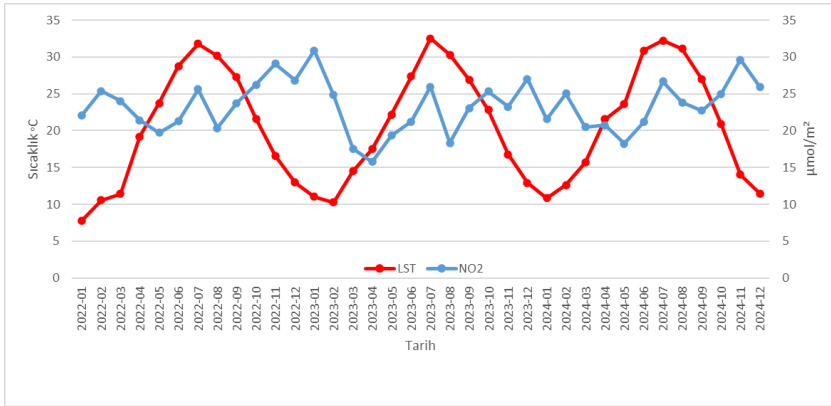
Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamından 2022–2024 dönemine ait elde edilen bulgular, Aksu, Serik, Gazipaşa, Kumluca ve Kepez/Varsak ilçelerindeki sera alanlarının baskın olduğu kırsal bölgelerde bazı atmosferik kirleticilerin davranışının, arazi kullanım özellikleri ve yerel emisyon kaynaklarıyla ilişki içerisinde olabileceğini göstermektedir.

Elde edilen bulgulara göre, LST_avg ile NO₂ konsantrasyonlarından her iki değişkenin de yıl içinde mevsimsel dalgalanmalar sergilediği, ancak bu değişimlerin güçlü ve anlamlı

bir doğrusal ilişki ortaya koymadığı ortaya çıkmıştır (Şekil 3). Yapılan korelasyon analizlerinde, 3 yıllık süreçte örtü altı üretim alanları ile LST_avg ile NO₂ arasında zayıf düzeyde ($r = -0.08$) ve istatistiksel olarak anlamlı olmayan ($p > 0.05$) bir ilişki belirlenmiştir. Bilindiği üzere, NO₂ başlıca motorlu taşıt trafiği, sanayi faaliyetleri ve yoğun enerji tüketimi ile ilişkilendirilen bir kirleticidir. İncelenen bölgelerin büyük bölümünün sera alanlarından ve düşük yoğunluklu yerleşimlerden oluşması, yüksek trafik ve sanayi kaynaklı emisyonların sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, yaz aylarında yüzey sıcaklığı önemli ölçüde artmasına rağmen NO₂ konsantrasyonlarında benzer bir artışın gözlenmemesini açıklamaktadır.

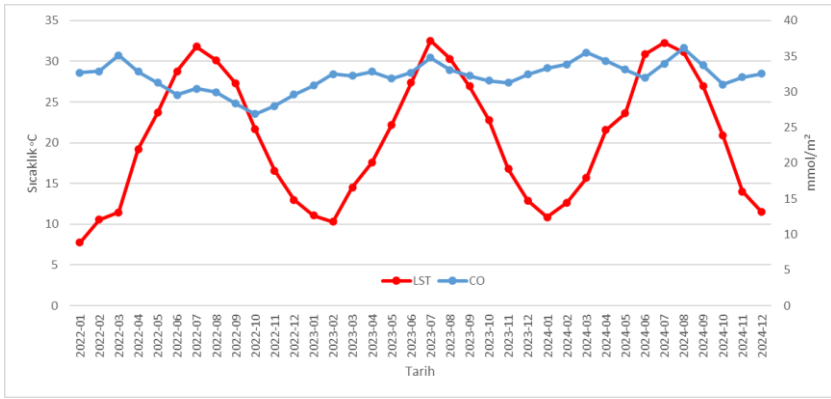
Şekil 3. Ortalama Yüzey Sıcaklığı (LST) – NO₂ İlişkisi



Ayrıca çalışmada kullanılan LST değerlerinin gece–gündüz ortalamasını temsil etmesi, maksimum gündüz sıcaklıklarının kısa süreli etkilerinin yumuşatılmasına neden olmaktadır. Bu durum, sıcaklık artışlarının NO₂ konsantrasyonlarına doğrudan ve güçlü biçimde yansımamasında etkili bir faktör olarak değerlendirilmiştir. Yılmaz & ark. (2021:1), kırsal ve tarımsal alanlarında NO₂'nin kentsel merkezlere kıyasla daha düşük ve daha stabil seviyelerde seyrettiğini belirtmişlerdir. Araştırmadan elde edilen bulgular da, ilgili literatürlerle paralellik göstermektedir.

Örtü altı alanlarının CO konsantrasyonları ile LST_avg arasındaki ilişkiler incelendiğinde ise, tıpkı NO₂'de olduğu, gibi zayıf ve istatistiksel olarak anlamlı olmayan korelasyon elde edilmiştir ($r = -0.02$, $p > 0.05$). Şekil 4'ten de görüleceği üzere, CO değerlerinin yıl boyunca görece dar bir aralıkta değişmesi, yüzey sıcaklığındaki mevsimsel artış ve azalışların CO konsantrasyonlarına belirgin şekilde yansımadağını göstermektedir (Şekil 4).

Şekil 4. Ortalama Yüzey Sıcaklığı (LST) – CO İlişkisi



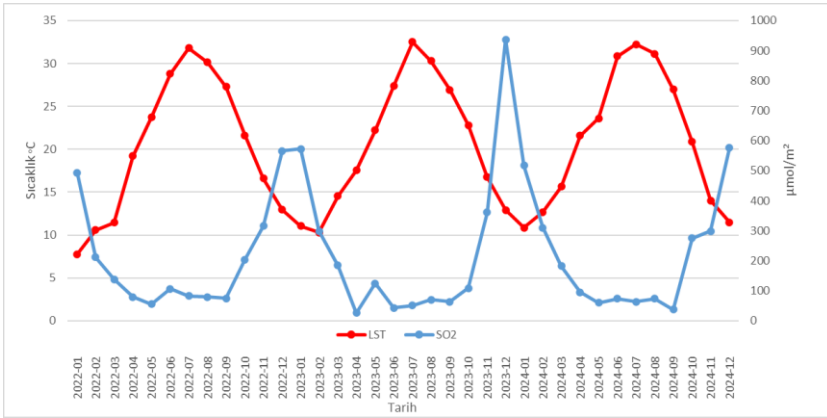
Karbon monoksit esas olarak eksik yanma süreçleri nedeni ile, özellikle trafik ve endüstriyel faaliyetler sonucunda atmosfere karışmaktadır. Bu kapsamda, çalışma alanının örtü altı üretim alanları ile kaplı olması ve bu bağlamda kırsal karakterli olması nedeni ile, CO gibi emisyon kaynaklarının da sınırlı kalmasına neden olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca sera alanlarının çoğunlukla açık ve düşük yapı yoğunluğuna sahip bölgelerde yer alması da, kirleticilerin atmosferde uzun süre birikmeden dağılmasına olanak sağlamaktadır.

MODIS LST ve Sentinel-5P/TROPOMI CO verilerini birlikte değerlendiren Broqueza & ark. (2024:77), LST–CO ilişkisinin düşük düzeyde olduğunu rapor etmiştir. Bu doğrultuda, Antalya ilindeki sera alanlarının bulunduğu kırsal bölgeler için elde

edilen sonuçlarda LST ile CO ilişkisinin zayıf bulunması literatürle paralellik göstermektedir.

Çalışmada örtü altı alanlarının SO₂ konsantrasyonları ile LST_avg değerleri arasındaki ilişki istatistiksel olarak değerlendirildiğinde ise, istatistiksel olarak zayıf bir ilişkinin olduğu belirlenmiş olmakla birlikte, ($r = -0.59$), 2022-2027 yılları boyunca aylık olarak belirli dönemlerde ani artışların (pikler) olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle sonbahar sonu ve kış aylarında SO₂ artışları şeklinde gözlenerek, yüzey sıcaklığındaki düşüşlerle eş zamanlı olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu bulgu, çalışma alanında SO₂'in örtü altı alanlarındaki ısıtma amaçlı fosil yakıt kullanımı ile ilişkisinin olduğunu göstermektedir (Şekil 4).

Şekil 4. Ortalama Yüzey Sıcaklığı (LST) – SO₂ İlişkisi



Antalya'daki örtü altı üretim bölgelerinde kış aylarında bitkisel üretimin devam edebilmesi için, bu alanların ısıtılması amacıyla kömür, fuel-oil ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar kullanılabilir. Bu süreçte ortaya çıkan SO₂ emisyonları, özellikle atmosferik karışımın zayıfladığı dönemlerde daha belirgin hale gelmektedir. Ayrıca Akdeniz iklimine özgü sakin rüzgâr koşulları ve zaman zaman oluşan durağan atmosfer koşulları, SO₂'nin atmosferde geçici olarak birikmesine neden olabilmektedir.

Benzer şekilde Sicard & ark. (2013:94) ve Pérez & ark. (2016:64), SO₂ konsantrasyonlarının kış aylarında sera ısıtma faaliyetleriyle ilişkili olarak arttığını rapor etmişlerdir. Bu kapsamda araştırmadan elde edilen bulgular da ilgili literatürlerle paralellik göstermektedir. Ayrıca elde edilen SO₂ bulguları, Antalya'daki örtü altı üretim alanlarının enerji kullanım dinamikleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, Antalya ilinde örtü altı tarım faaliyetlerinin yoğun olarak gerçekleştirildiği alanlarda atmosferik kirleticilerin mekânsal ve zamansal örüntüleri, Sentinel-5P/TROPOMI uydu verileri ve MODIS yüzey sıcaklığı (LST) kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda Google Earth Engine platformu üzerinden derlenen NO₂, CO ve SO₂ kolon yoğunlukları ile LST verileri, 2022–2024 dönemi boyunca birlikte değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, örtü altı alanlarında NO₂ ve CO ile ortalama yüzey sıcaklığı arasında anlamlı ve güçlü bir ilişki bulunmadığını göstermiş olup yüzey sıcaklığındaki değişimlerin NO₂ ve CO düzeylerinde doğrudan bir artış veya azalışa yol açmadığı tespit edilmiştir. Yapılan bir diğer analizde, SO₂ konsantrasyonlarında özellikle sonbahar sonu ve kış aylarında dönemsel artışlar gözlenmiş olup, bu artışın nedeni olarak sera alanlarında üretimin sürdürülebilmesi amacıyla kullanılan fosil yakıt temelli ısıtma sistemleriyle ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, sera alanlarında hava kalitesinin yalnızca sıcaklıkla değil, aynı zamanda mevsimsel enerji tüketim biçimleriyle de şekillendiğini ortaya koymuştur.

Çalışma süresince uydu tabanlı verilerin doğası gereği bulut örtüsü ve atmosferik koşullar nedeniyle bazı zaman dilimlerinde veri kayıpları yaşanmıştır. Özellikle bulutluluk oranının yüksek olduğu dönemlerde (örneğin kış ve geçiş mevsimleri), Sentinel-5P seviyesinde güvenilir veri sayısı azaldığı için zamansal örnekleme

periyotları çalışmanın geneline göre değiştirilmek zorunda kalınmıştır. Bu durumun, belirli aylara ait kirletici seviyelerinin doğrudan karşılaştırılmasını sınırlayabileceği ve verilerde zamansal boşluklara neden olabileceğini ortaya koymaktadır. Bu tür uydu veri sınırlılıkları, literatürdeki diğer benzer çalışmalarda da raporlanmıştır. Uzaktan algılama temelli yaklaşımlar geniş alanlarda atmosferik kirleticilerin izlenmesi açısından güçlü bir araç olmasına rağmen, bulutluluk gibi atmosferik engellerin doğrudan bir uydu çalışmasının kapsamını kısıtlayabileceği pek çok çalışmada ortaya konmuştur. Bu nedenle, uydu verileri ile yer tabanlı ölçümlerin entegrasyonunun yapıldığı çalışmaların yaygınlaştırılması ile daha detaylı sonuçların elde edilmesi mümkün olabilecektir. Ayrıca, meteorolojik parametrelerin (rüzgâr hızı, nem gibi) etkileri ve farklı ısıtma sistemleri ile yakıt türlerinin analizi gibi ek değişkenlerin incelenmesi, sera alanlarında kirletici davranışının daha kapsamlı anlaşılmasını da sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma uzaktan algılama verilerinin tarımsal faaliyetlerin atmosferik etkilerini analiz etmede kullanılabileceğini göstermiş; aynı zamanda bulutluluk ve uydu veri boşluklarının sonuç yorumlarını sınırlandırabileceğini vurgulamıştır. Bu sınırlılıkların açıkça belirtilmesi, çalışmanın bilimsel geçerliliğini artırmakta ve gelecekteki araştırmalar için önemli ipuçları sunmaktadır.

Kaynakça

Broqueza, M. J., Cruz, L. M., Mana-ay, M., Jamboy, A. M., & Ramos, R. V. (2024). GIS-Based Regression analysis of air quality and land surface temperature in metro manila airsheds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 77-83.

Demir, M. (2018). Antalya ili sera alanlarında sıcaklık değişimlerinin atmosferik gazlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Türkiye Coğrafya Dergisi*, 70, 45–58.

EPA. (2022). *Integrated science assessment (ISA) for oxides of nitrogen – Health criteria*. U.S. Environmental Protection Agency. (19/12/2025 tarihinde <https://www.epa.gov> adresinden ulaşılmıştır)

European Space Agency. (n.d.). *European Space Agency*. (19/12/2025 tarihinde <https://www.esa.int/> adresinden ulaşılmıştır)

Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics (5th ed.)*. SAGE Publications.

García, M. Á., & Pardo, N. (2016). Influence of greenhouse heating systems on SO₂ levels in Mediterranean agricultural areas. *Atmospheric Research*, 178–179, 64–72. doi:10.1016/j.atmosres.2016.03.013

García, J., Fernández, A., & Sánchez, M. L. (2021). Wintertime NO₂ enhancement associated with greenhouse heating activities derived from Sentinel-5P TROPOMI observations. *Atmospheric Environment*, 246, 118123. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.118123

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. doi:10.1016/j.rse.2017.06.031

Karimi, A., Shamsipour, A., & Abbaspour, K. C. (2022). Seasonal variability of NO₂ and SO₂ over agricultural regions using Sentinel-5P TROPOMI observations. *Science of the Total Environment*, 806, 150609. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150609

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2021). *Remote sensing and image interpretation (8th ed.)*. John Wiley & Sons.

Müller, D., Klingberg, J., & Karlsson, P. E. (2022). Impacts of air pollution on ecosystems and human health. *Environmental Science & Policy*, 132, 88–97. doi:10.1016/j.envsci.2022.02.007

National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). MODIS (19/12/2025 tarihinde <https://modis.gsfc.nasa.gov> adresinden ulaşılmıştır).

Pérez, I. A., Sánchez, M. L., García, M. Á., & Pardo, N. (2016). Influence of greenhouse heating systems on SO₂ levels in Mediterranean agricultural areas. *Atmospheric Research*, 178–179, 64. doi:10.1016/j.atmosres.2016.03.013

Rodgers, J. L., & Nicewander, W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, 42(1), 59–66. doi:10.1080/00031305.1988.10475524

Sicard, P., De Marco, A., Dalstein-Richier, L., Tagliaferro, F., & Renou, C. (2013). An epidemiological assessment of ozone and nitrogen dioxide impacts on crop yields in Mediterranean areas. *Environmental Pollution*, 177, 94–102. doi:10.1016/j.envpol.2013.02.003

Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83. doi:10.1016/j.rse.2011.09.027

Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36–45. doi:10.1016/j.rse.2013.08.027

WHO. (2023). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. (19/12/2025 tarihinde <https://www.who.int> adresinden alınmıştır).

Yılmaz, H., Kaya, Ş., & Demirtaş, A. (2021). Antalya ve Mersin illerinde örtü altı tarım alanlarının yüzey sıcaklığı ve hava kirleticilerle ilişkisi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 77, 1–15. doi:10.17211/tcd.2021.77.01

Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., Wang, Y. (2020). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical Reviews*, 120(9), 4467–4522. doi:10.1021/acs.chemrev.9b00528

BÖLÜM 4

DÜŞÜK MALİYETLİ OTOMASYON SİSTEMLERİNİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ TARIMSAL ALANLARA UYGULANABİLİRLİĞİ

UMUT MUCAN¹
EZGİ KURTULMUŞ²

Giriş

Tarım sektörü, artan dünya nüfusu, iklim değişikliğinin etkileri, doğal kaynakların azalması ve girdi maliyetlerindeki sürekli artış nedeniyle küresel ölçekte önemli bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), 2050 yılına kadar dünya nüfusunun yaklaşık 9,7 milyara ulaşacağını ve bu nüfusun gıda ihtiyacını karşılamak için tarımsal üretimin en az %60 oranında artırılması gerektiğini belirtmektedir (Gyamfi & ark., 2024; Janni & ark., 2024; Solomon & ark., 2021). Bu artışın, mevcut kaynakların daha verimli kullanılması yoluyla sağlanması zorunlu hale gelmiştir. Özellikle su, enerji ve tarım arazileri gibi sınırlı

¹Araş. Gör. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Orcid: 0000-0002-7126-9774

² Dr. Öğretim Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü Orcid: 0000-0003-2535-2566

kaynakların sürdürülebilir yönetimi, günümüz tarım politikalarının ve bilimsel çalışmalarının temel odak noktalarından biri olmuştur.

Dünya genelinde tarımsal üretimin önemli bir bölümü küçük ölçekli tarım işletmeleri tarafından gerçekleştirilmektedir. FAO tarafından yayımlanan güncel raporlara göre, dünya genelindeki tarım işletmelerinin yaklaşık %84'ü 2 hektardan küçük aile işletmelerinden oluşmakta ve bu işletmeler toplam küresel gıda üretiminin yaklaşık üçte birini sağlamaktadır (Chai & ark., 2021; Dhillon & Moncur, 2023; Noack & Larsen, 2019). Tarım işletmelerinin büyük bir kısmı küçük ve parçalı arazilere sahip olup, ortalama işletme büyüklüğü 6–7 hektar civarındadır. Bu durum, küçük ölçekli tarımın ülke gıda güvenliği ve kırsal kalkınma açısından stratejik önemini ortaya koymaktadır.

Ancak küçük ölçekli tarım işletmeleri, teknolojik yeniliklere erişim, sermaye yetersizliği, düşük mekanizasyon düzeyi ve iklim değişkenliğine karşı kırılganlık gibi çok sayıda yapısal sorunla karşı karşıyadır (Wilk & ark., 2012). Özellikle geleneksel üretim yöntemlerine dayalı tarımsal faaliyetlerde, sulama suyu ve enerji kaynaklarının etkin kullanılmaması hem ekonomik kayıplara hem de çevresel baskıların artmasına neden olmaktadır. İklim değişikliğiyle birlikte artan kuraklık riski, düzensiz yağış rejimleri ve ekstrem hava olayları, küçük ölçekli üreticilerin risk yönetimini daha da zorlaştırmaktadır (Li & ark., 2023; Rosa, 2022).

Son yıllarda tarım sektöründe yaşanan dijital dönüşüm, bu sorunlara çözüm üretme potansiyeli taşımaktadır. Tarımsal otomasyon, sensörler, kontrol sistemleri ve veri temelli karar mekanizmaları aracılığıyla üretim süreçlerinin izlenmesi ve yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri ve yapay zekâ tabanlı uygulamalar, özellikle büyük ölçekli işletmelerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknolojiler sayesinde sulama, gübreleme ve iklimlendirme gibi

işlemler gerçek zamanlı verilere dayalı olarak optimize edilebilmektedir (Misra & ark., 2022; Alazzai & ark., 2024; Hussein & ark., 2024). Bununla birlikte, mevcut tarımsal otomasyon ve akıllı tarım uygulamalarının önemli bir kısmı yüksek yatırım maliyetleri, karmaşık teknik altyapılar ve sürekli bakım gereksinimleri nedeniyle küçük ölçekli tarım işletmeleri için erişilebilir değildir. FAO ve Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) tarafından Türkiye özelinde yapılan değerlendirmelerde, dijital tarım teknolojilerinin küçük çiftçiler tarafından benimsenmesinin önündeki en büyük engellerin ekonomik kısıtlar, teknik bilgi eksikliği ve ölçek uyumsuzluğu olduğu vurgulanmıştır. Bu durum, tarımsal dijitalleşmenin yalnızca büyük işletmelerle sınırlı kalması riskini doğurmakta ve küçük üreticiler açısından dijital bir uçurum oluşmasına neden olmaktadır. (Xie & ark., 2021; Mollel & ark., 2025).

Bu noktada düşük maliyetli otomasyon sistemleri, küçük ölçekli tarım alanları için önemli bir alternatif çözüm olarak öne çıkmaktadır. Açık kaynaklı donanım ve yazılımlara dayalı, modüler ve ölçeklenebilir yapıya sahip bu sistemler; nispeten düşük yatırım maliyetleriyle tarımsal üretim süreçlerinin izlenmesine ve otomatik kontrolüne olanak tanımaktadır. Arduino ve benzeri mikrodenetleyici tabanlı sistemler, düşük maliyetli sensörler ve kablosuz haberleşme teknolojileri sayesinde, küçük çiftçilerin sulama ve çevresel koşulları gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi mümkün hale gelmiştir (Borges & ark., 2024).

Düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin tarımda kullanımıyla su ve enerji tasarrufunun artırılabilirdiği, iş gücü ihtiyacının azaltıldığı ve ürün verimliliğinin iyileştirildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Sensör tabanlı sulama sistemlerinin, geleneksel yöntemlere kıyasla %20–50 oranında su tasarrufu sağladığı ve aynı zamanda bitki gelişimini olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir. Bu tür sistemler, özellikle su kaynaklarının kısıtlı

olduğu yarı kurak ve kurak bölgelerde küçük ölçekli üreticiler için kritik bir avantaj sunmaktadır (Daraz & ark., 2025; Rehman & ark., 2022; Zhang & ark., 2021).

Tarımsal Otomasyon ve Dijital Tarım Kavramı

Tarım sektöründe verimliliğin artırılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi amacıyla geliştirilen teknolojik yaklaşımlar, son yıllarda “tarımsal otomasyon” ve “dijital tarım” kavramları etrafında yoğunlaşmaktadır (Rehman & ark., 2022). Bu kavramlar, üretim süreçlerinin geleneksel yöntemlerden veri temelli ve otomatik sistemlere doğru evrilmesini ifade etmektedir. Özellikle iklim değişikliği, artan girdi maliyetleri ve iş gücü yetersizliği gibi baskılar, tarımda otomasyon ve dijitalleşmenin önemini daha da artırmıştır (Padhiary & ark., 2024; Pierre & ark., 2023)

Tarımsal Otomasyonun Tanımı ve Kapsamı

Tarımsal otomasyon, tarımsal üretim süreçlerinde insan müdahalesini en aza indirmek amacıyla sensörler, kontrol sistemleri ve aktüatörler aracılığıyla gerçekleştirilen otomatik izleme ve kontrol faaliyetlerini kapsamaktadır. Bu sistemler; sulama, gübreleme, iklimlendirme, havalandırma ve hasat gibi temel tarımsal işlemlerin önceden belirlenmiş kurallara veya gerçek zamanlı verilere dayalı olarak otomatik biçimde yürütülmesini sağlamaktadır.

Geleneksel tarım uygulamalarında üretim kararları büyük ölçüde çiftçinin deneyimine ve gözlemlerine dayanırken, otomasyon sistemleri bu kararları sayısal verilere dayandırmaktadır. Örneğin toprak nem sensörlerinden elde edilen veriler, sulama zamanının belirlenmesinde kullanılmakta; ortam sıcaklığı ve bağıl nem değerleri, sera içi iklim kontrolünü yönlendirmektedir. Bu yaklaşım, tarımsal faaliyetlerde hem zamanlama hatalarını azaltmakta hem de kaynak kullanımında etkinliği artırmaktadır (Mansoor & ark., 2025; Rehman & ark., 2022).

Tarımsal otomasyonun temel bileşenleri genel olarak üç ana grupta ele alınmaktadır:

- Algılama (sensör) sistemleri,
- Karar ve kontrol birimleri,
- Uygulayıcı (aktüatör) sistemler (Ashoka & ark., 2024; Sharma & ark., 2024).

Bu yapı sayesinde tarımsal üretim ortamından sürekli veri toplanmakta, bu veriler kontrol algoritmaları aracılığıyla değerlendirilmekte ve gerekli müdahaleler otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Özellikle sulama otomasyonu, tarımsal otomasyon uygulamaları arasında en yaygın ve en hızlı benimsenen alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Padhiary & ark., 2024; Ritambara & ark., 2024).

Dijital Tarım Kavramı ve Tarım 4.0 Yaklaşımı

Dijital tarım, tarımsal üretim süreçlerinin tamamında dijital teknolojilerin kullanılması yoluyla veriye dayalı bir yönetim anlayışının benimsenmesini ifade etmektedir. Bu kavram, tarımsal otomasyonu da kapsayan daha geniş bir çerçeve sunmakta; sensörler, uydu görüntüleri, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), büyük veri analitiği ve yapay zekâ gibi teknolojilerin entegrasyonunu içermektedir (Alazzai & ark., 2024; Javaid & ark., 2022).

Son yıllarda literatürde sıklıkla kullanılan Tarım 4.0 kavramı, Endüstri 4.0 yaklaşımının tarım sektörüne uyarlanmış biçimi olarak tanımlanmaktadır. Tarım 4.0; akıllı sensörler, Nesnelerin İnterneti (IoT), siber-fiziksel sistemler ve otonom karar mekanizmaları aracılığıyla tarımsal üretimin dijitalleştirilmesini hedeflemektedir. Bu yaklaşımda tarım, yalnızca fiziksel bir üretim faaliyeti değil, aynı zamanda sürekli veri üreten ve bu veriler üzerinden yönetilen dinamik bir sistem olarak ele alınmaktadır (Issa & ark., 2024; Reddy & ark., 2024).

Dijital tarım uygulamaları sayesinde tarım işletmeleri üretim süreçlerini anlık olarak izleyebilmekte, geçmiş verileri analiz edebilmekte ve geleceğe yönelik tahminler oluşturabilmektedir. Örneğin, uzun dönemli iklim ve toprak verilerinin analiz edilmesiyle kuraklık riski önceden tahmin edilebilmekte veya bitki gelişim modelleri aracılığıyla optimum sulama ve gübreleme stratejileri geliştirilebilmektedir. Bu yönüyle dijital tarım, yalnızca operasyonel bir iyileştirme değil, aynı zamanda stratejik bir karar destek aracı olarak değerlendirilmektedir (Escribà-Gelonch & ark., 2024; Fuentes-Peñailillo & ark., 2024).

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT), fiziksel nesnelerin sensörler ve haberleşme teknolojileri aracılığıyla internete bağlanarak veri üretmesini ve bu verilerin uzaktan izlenebilmesini ifade etmektedir. Tarım sektöründe IoT teknolojilerinin kullanımı, akıllı tarım kavramının temelini oluşturmaktadır (Rehman & ark., 2022).

IoT tabanlı tarım sistemlerinde, tarla veya sera ortamına yerleştirilen sensörler aracılığıyla sıcaklık, nem, toprak su içeriği, ışınım ve benzeri parametreler sürekli olarak ölçülmektedir. Elde edilen bu veriler, kablosuz iletişim teknolojileri (Wi-Fi, GSM, LoRa vb.) aracılığıyla merkezi bir sisteme iletilmekte ve burada analiz edilerek otomatik kontrol kararları üretilmektedir. Bu sayede tarımsal üretim süreçleri, mekândan ve zamandan bağımsız olarak izlenebilir ve yönetilebilir hale gelmektedir (Madushanki & ark., 2019; Ojha & ark., 2025).

Akıllı tarım sistemleri, özellikle su ve enerji yönetimi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sensör tabanlı izleme sayesinde gereksiz sulama önlenmekte, bitki su stresi azaltılmakta ve su kullanım verimliliği artırılmaktadır. Benzer şekilde, iklim kontrollü sera sistemlerinde enerji tüketimi optimize edilerek hem üretim maliyetleri düşürülmekte hem de çevresel etkiler azaltılmaktadır (Safdar & ark., 2024).

Büyük Ölçekli ve Küçük Ölçekli Tarımda Dijitalleşme Farklılıkları

Dijital tarım ve otomasyon uygulamaları, literatürde çoğunlukla büyük ölçekli tarım işletmeleri üzerinden ele alınmaktadır. Büyük işletmeler, yüksek yatırım maliyetlerini karşılayabilmekte ve ileri teknoloji çözümlerinden daha hızlı faydalanabilmektedir. Ancak bu durum, küçük ölçekli tarım işletmeleri açısından önemli bir eşitsizlik yaratmaktadır. İjital tarım teknolojilerinin küçük çiftçiler tarafından benimsenmesinin önünde ekonomik ve teknik engeller bulunduğunu ve bu durumun dijital bir uçuruma yol açabileceğini vurgulamaktadır (Marshall & ark., 2022; Xie & ark., 2021).

Küçük ölçekli tarım alanlarında dijitalleşmenin başarıyla uygulanabilmesi için sistemlerin düşük maliyetli, basit, ölçeklenebilir ve kullanıcı dostu olması gerekmektedir. Bu bağlamda, tarımsal otomasyonun küçük ölçekli üreticilere uyarlanması, dijital tarımın kapsayıcı ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşması açısından kritik öneme sahiptir (Van Loon & ark., 2018; Williams & ark., 2019).

Küçük Ölçekli Tarımsal Alanlarda Düşük Maliyetli Otomasyon Uygulamaları

Düşük maliyetli otomasyon sistemleri, küçük ölçekli tarımsal alanlarda üretim süreçlerinin izlenmesi ve yönetilmesi açısından önemli uygulama olanakları sunmaktadır. Bu sistemler, sınırlı sermayeye sahip üreticilerin tarımsal faaliyetlerini daha verimli, kontrollü ve sürdürülebilir bir şekilde yürütmesine katkı sağlamaktadır. Literatürde, düşük maliyetli ve modüler yapıya sahip otomasyon çözümlerinin özellikle sulama, sera üretimi, açık alan tarımı ve hayvancılık uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Ayompe & ark., 2025; Zerssa & ark., 2021).

Sulama Sistemlerinde Düşük Maliyetli Otomasyon Uygulamaları

Sulama, tarımsal üretimde su tüketiminin en yoğun olduğu faaliyetlerden biridir ve küçük ölçekli tarım işletmelerinde genellikle geleneksel yöntemlerle yürütülmektedir. Bu durum hem su kaynaklarının verimsiz kullanılmasına hem de üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Düşük maliyetli otomasyon sistemleri, toprak nem sensörleri ve zamanlayıcılar aracılığıyla sulama işlemlerinin otomatik olarak kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır (Monamodi & ark., 2025).

Toprak nemine dayalı otomatik sulama sistemlerinde, sensörlerden elde edilen veriler mikrodenetleyici birimler tarafından değerlendirilmekte ve bitkinin su ihtiyacına göre sulama başlatılmakta veya durdurulmaktadır. Bu yaklaşım, gereksiz sulamayı önleyerek su tasarrufu sağlamaktadır. Literatürde sensör tabanlı sulama sistemlerinin, geleneksel yöntemlere kıyasla %20–50 oranında su tasarrufu sağladığı ve aynı zamanda bitki gelişimini olumlu yönde etkilediği bildirilmektedir (Kaur & ark., 2024; Kumar & ark., 2024; Taneja & Bhatia, 2017).

Küçük ölçekli tarım alanlarında düşük maliyetli sulama otomasyonu, özellikle damla sulama sistemleriyle entegre edildiğinde yüksek bir uygulanabilirlik göstermektedir. Açık kaynaklı donanım ve yazılımlar sayesinde, çiftçiler sulama programlarını kendi ihtiyaçlarına göre uyarlayabilmekte ve sistemi düşük bakım maliyetleriyle sürdürebilmektedir. Bu tür uygulamalar, su kıtlığının giderek arttığı yarı kurak ve kurak bölgelerde küçük üreticiler için önemli bir avantaj sunmaktadır.

Sera ve Örtü Altı Üretimde Otomasyon Uygulamaları

Sera ve örtü altı üretim sistemlerinde çevresel koşulların kontrolü, ürün verimi ve kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Sıcaklık, bağıl nem, havalandırma ve ışık gibi parametrelerin uygun

aralıklarda tutulması, bitki gelişimini doğrudan etkilemektedir. Ancak küçük ölçekli sera işletmelerinde bu kontroller genellikle manuel olarak yapılmakta ve bu durum hem iş gücü ihtiyacını artırmakta hem de kontrol hassasiyetini azaltmaktadır (Bersani & ark., 2020; Riahi & ark., 2024).

Düşük maliyetli otomasyon sistemleri, sera ortamında sıcaklık ve nem sensörleri aracılığıyla çevresel koşulların izlenmesini ve fan, havalandırma pencereleri veya sisleme sistemlerinin otomatik olarak devreye alınmasını sağlamaktadır. Bu sayede sera içi mikroklima daha dengeli bir şekilde yönetilebilmekte ve bitkilerin stres koşullarına maruz kalması azaltılmaktadır (Lee & ark., 2024).

Literatürde yapılan çalışmalar, düşük maliyetli sera otomasyon sistemlerinin enerji tüketimini optimize ettiğini ve ürün kalitesinde iyileşmeler sağladığını ortaya koymaktadır. Özellikle açık kaynaklı kontrol sistemlerinin kullanımı, küçük üreticilerin sera otomasyonuna erişimini kolaylaştırmakta ve bu sistemlerin ekonomik açıdan uygulanabilirliğini artırmaktadır (Haq & ark., 2023; Lee & ark., 2024).

Açık Alan Tarımında Düşük Maliyetli İzleme ve Kontrol Sistemleri

Açık alan tarımında çevresel koşulların kontrolü, sera sistemlerine kıyasla daha sınırlıdır. Bununla birlikte, düşük maliyetli otomasyon sistemleri sayesinde açık alan tarımında da izleme ve karar destek mekanizmaları geliştirilebilmektedir. Toprak nemi, sıcaklık ve yağış gibi parametrelerin sürekli izlenmesi, üreticilerin sulama ve diğer tarımsal uygulamaları daha bilinçli bir şekilde planlamasına olanak tanımaktadır (Indurthi & ark., 2024; Robles Algarín & ark., 2017).

IoT tabanlı düşük maliyetli sistemler, açık alan tarımında uzaktan izleme imkânı sunarak çiftçilerin tarlalarını fiziksel olarak

sürekli kontrol etme ihtiyacını azaltmaktadır. Bu durum, özellikle birden fazla küçük parseli bulunan üreticiler için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Açık alan izleme sistemleri, aynı zamanda uzun dönemli veri birikimi oluşturarak tarımsal kararların geçmiş verilere dayalı olarak alınmasına katkı sağlamaktadır (Dankan Gowda & ark., 2021; Mahajan, 2022).

Hayvancılıkta Düşük Maliyetli Otomasyon ve İzleme Sistemleri

Düşük maliyetli otomasyon uygulamaları yalnızca bitkisel üretimle sınırlı olmayıp, küçük ölçekli hayvancılık işletmelerinde de giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle ahır içi çevresel koşulların izlenmesi, hayvan refahı ve verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Sıcaklık, bağıl nem ve gaz konsantrasyonlarının izlenmesi, hayvan sağlığını olumsuz etkileyebilecek koşulların erken tespit edilmesini mümkün kılmaktadır (Jiang & ark., 2023).

IoT tabanlı düşük maliyetli sensör sistemleri, ahır ortamındaki hava kalitesinin izlenmesine ve havalandırma sistemlerinin otomatik olarak kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Literatürde bu tür sistemlerin hayvan refahını artırdığı, stres seviyelerini azalttığı ve dolaylı olarak verimlilik üzerinde olumlu etkiler yarattığı belirtilmektedir. Küçük ölçekli hayvancılık işletmelerinde bu sistemlerin uygulanabilirliği, düşük kurulum maliyetleri ve basit kullanım arayüzleri sayesinde artmaktadır. Bu durum, hayvancılıkta otomasyonun yalnızca büyük işletmelere özgü bir uygulama olmaktan çıkmasına katkı sağlamaktadır (Lascano-Rivera & ark., 2025; Saban & ark., 2022).

Ekonomik ve Teknik Açılardan İnceleme

Düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin küçük ölçekli tarımsal alanlarda yaygınlaştırılabilmesi, bu sistemlerin yalnızca teknik olarak çalışabilir olmasına değil, aynı zamanda ekonomik açıdan sürdürülebilir olmasına da bağlıdır. Küçük ölçekli tarım işletmelerinde yatırım kararları genellikle sınırlı sermaye, yüksek

risk algısı ve belirsiz geri dönüş beklentileri nedeniyle temkinli bir şekilde alınmaktadır. Bu nedenle otomasyon sistemlerinin uygulanabilirliği değerlendirilirken, teknik performans göstergelerinin yanı sıra kurulum maliyeti, işletme ve bakım giderleri ile geri ödeme süresi gibi ekonomik unsurların birlikte ele alınması gerekmektedir (Jafri & ark., 2024; Ribeiro & ark., 2024).

Düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin en önemli ekonomik avantajı, geleneksel ticari otomasyon çözümlerine kıyasla daha düşük başlangıç yatırım maliyetine sahip olmalarıdır. Açık kaynaklı mikrodenetleyiciler, düşük maliyetli sensörler ve basit kontrol elemanları kullanılarak geliştirilen bu sistemler, küçük ölçekli işletmeler için erişilebilir bir yatırım düzeyi sunmaktadır. Literatürde, küçük ölçekli sulama veya sera otomasyon sistemlerinin kurulum maliyetlerinin ticari çözümlere kıyasla yaklaşık %40–70 oranında daha düşük olduğu bildirilmektedir (Ferrarezi & ark., 2015; Jafri & ark., 2024).

Ekonomik değerlendirmede dikkate alınması gereken temel unsurlar; kurulum maliyeti, işletme ve bakım giderleri, sağlanan tasarruflar ve geri ödeme süresi olarak öne çıkmaktadır. Düşük maliyetli sistemlerde bakım giderleri genellikle düşüktür ve çoğu durumda basit kullanıcı müdahaleleriyle giderilebilmektedir. Bu durum, özellikle kırsal alanlarda teknik servis erişiminin sınırlı olduğu koşullarda önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Su ve enerji tasarrufu, ekonomik uygulanabilirliğin belirleyici bileşenleri arasında yer almaktadır. Sensör tabanlı sulama otomasyonu sayesinde gereksiz sulama uygulamaları önlenmekte ve su tüketimi azaltılmaktadır. Çeşitli çalışmalarda, otomatik sulama sistemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla %20–50 arasında su tasarrufu sağladığı ve bunun doğrudan işletme maliyetlerini düşürdüğü belirtilmektedir. Enerji tüketiminin optimize edilmesi ise özellikle elektrikle çalışan sulama ve sera sistemlerinde ekonomik kazanımları artırmaktadır (Tavan & ark., 2021; Touil & ark., 2022).

Geri ödeme süresi açısından bakıldığında, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin çoğu uygulamada 1–3 yıl içinde kendini amorti edebildiği rapor edilmektedir. Bu süre, işletmenin büyüklüğüne, üretim desenine ve sistemin kullanım yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Küçük ölçekli tarım işletmeleri için bu düzeyde bir geri ödeme süresi, yatırımın kabul edilebilirliğini artıran önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Bazaluk & ark., 2022; Bekmuratov & ark., 2024).

Teknik açıdan uygulanabilirlik, otomasyon sistemlerinin saha koşullarında güvenilir biçimde çalışabilmesi, kullanıcı ihtiyaçlarına cevap verebilmesi ve uzun vadede sürdürülebilir olması ile doğrudan ilişkilidir. Küçük ölçekli tarımsal alanlarda kullanılan düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin; açık alan koşulları, değişken iklim faktörleri ve sınırlı altyapı gibi zorluklara karşı yeterli dayanıklılığa sahip olması gerekmektedir. Bu bağlamda sensör ve kontrol bileşenlerinin doğruluğu ve güvenilirliği, teknik performansı doğrudan etkilemektedir. Özellikle toprak nem sensörlerinde kalibrasyon eksikliği veya çevresel koşullara bağlı ölçüm hataları sistemin etkinliğini azaltabilmektedir. Ancak uygun kalibrasyon ve periyodik bakım uygulamalarıyla düşük maliyetli sensörlerin tarımsal uygulamalar için yeterli doğruluk düzeyine ulaşabildiği literatürde belirtilmektedir (Aguado & ark., 2025; Shi & ark., 2021).

Teknik uygulanabilirliği etkileyen bir diğer önemli unsur, sistemlerin basit ve kullanıcı dostu bir yapıya sahip olmasıdır. Küçük ölçekli üreticilerin büyük bir kısmının ileri düzey teknik bilgiye sahip olmaması, otomasyon sistemlerinin kurulum, kullanım ve bakım süreçlerinin mümkün olduğunca sade tasarlanmasını gerekli kılmaktadır. Açık kaynaklı yazılımlar ve görsel arayüzler, bu sistemlerin kullanıcılar tarafından benimsenmesini kolaylaştıran unsurlar arasında yer almaktadır.

Enerji altyapısı da teknik uygulanabilirliği belirleyen faktörlerden biridir. Kırsal alanlarda elektrik erişiminin sınırlı olduğu durumlarda, düşük güç tüketimine sahip sistemler ve güneş enerjisi destekli çözümler öne çıkmaktadır. Literatürde, güneş enerjisiyle çalışan düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin özellikle açık alan tarımında teknik açıdan başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Aryanfar & ark., 2022; Awais & ark., 2024).

Ekonomik ve teknik boyutlar birlikte değerlendirildiğinde, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin küçük ölçekli tarımsal alanlar için yüksek bir uygulanabilirlik potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu sistemlerin başarısı; kullanıcı eğitimi, sistem tasarımının yerel koşullara uyumu ve uzun vadeli bakım stratejileri ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin yaygınlaştırılmasında yalnızca teknolojik unsurların değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir (Carrasco & ark., 2024; Voicea & ark., 2024).

Avantajlar, Sınırlılıklar ve Uygulamadaki Zorluklar

Düşük maliyetli otomasyon sistemleri, küçük ölçekli tarımsal alanlarda üretim süreçlerinin modernize edilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak bu sistemlerin uygulanabilirliği yalnızca sundukları avantajlarla değil, aynı zamanda sahip oldukları sınırlılıklar ve uygulama sürecinde karşılaşılan zorluklarla birlikte değerlendirilmelidir. Bu bütüncül yaklaşım, teknolojinin küçük ölçekli tarımda sürdürülebilir biçimde yaygınlaştırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Düşük Maliyetli Otomasyon Sistemlerinin Avantajları

Düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin en belirgin avantajı, erişilebilir yatırım maliyeti sunmalarıdır. Açık kaynaklı donanım ve yazılım bileşenlerine dayalı bu sistemler, küçük ölçekli tarım işletmelerinin sınırlı sermaye yapısına uygun çözümler

retmektedir. Geleneksel ticari otomasyon sistemlerine kıyasla daha düşük kurulum maliyetleri, küçük üreticilerin teknolojiye erişimini kolaylaştırmaktadır.

Bir diğer önemli avantaj, kaynak kullanım verimliliğinin artırılmasıdır. Sensör tabanlı izleme ve otomatik kontrol mekanizmaları sayesinde su ve enerji kullanımını optimize edilmekte, gereksiz tüketim önlenmektedir. Özellikle sulama otomasyonunda sağlanan su tasarrufu hem ekonomik kazanç sağlamakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır (Abba & ark., 2019; Reddy & ark., 2024).

Düşük maliyetli otomasyon sistemleri, iş gücü ihtiyaını azaltarak üretim süreçlerinin daha verimli yönetilmesini sağlamaktadır. Manuel kontrol gerektiren birçok işlem otomatik hale gelmekte, bu durum hem zaman tasarrufu yaratmakta hem de iş gücü maliyetlerini düşürmektedir. Ayrıca uzaktan izleme imkânı sayesinde üreticiler, tarımsal faaliyetlerini mekândan bağımsız olarak takip edebilmektedir.

Bu sistemlerin modüler ve ölçeklenebilir yapıya sahip olması, farklı büyüklükteki tarımsal alanlara uyarlanabilmesini mümkün kılmaktadır. Üreticiler, ihtiyaçlarına göre sistemi aşamalı olarak genişletebilmekte ve bu sayede yatırım maliyetlerini zamana yayabilmektedir. Bu zellik, küçük ölçekli tarım işletmeleri için önemli bir esneklik sağlamaktadır.

Teknik ve Operasyonel Sınırlılıklar

Her ne kadar düşük maliyetli otomasyon sistemleri önemli avantajlar sunsa da, bazı teknik ve operasyonel sınırlılıklara sahiptir. Bu sistemlerde kullanılan düşük maliyetli sensörler, yüksek hassasiyetli endüstriyel sensörlere kıyasla daha sınırlı ölçüm doğruluğuna sahip olabilmektedir. Özellikle toprak nem sensörlerinde çevresel faktörlere bağlı ölçüm hataları, sistem performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Kojima & ark., 2016).

Bir diğ er sınırlılık, sistemlerin dayanıklılığı ve uzun vadeli güvenilirliği ile ilgilidir. Tarımsal ortamlar; toz, nem, sıcaklık değişimleri ve fiziksel darbelere açık alanlar olduğundan, düşük maliyetli donanımların bu koşullara karşı yeterli korumaya sahip olmaması arızalara yol açabilmektedir. Bu durum, sistemlerin bakım ihtiya ını artırabilmektedir.

İletişim altyapısına bağımlılık da önemli bir sınırlılık olarak değerlendirilmektedir. IoT tabanlı otomasyon sistemlerinde veri aktarımı için internet veya mobil ağlara ihtiyaç duyulmaktadır. Kırsal alanlarda altyapı eksikliği veya bağlantı sorunları, sistemlerin kesintisiz çalışmasını zorlaştırabilmektedir (Chughtai & ark., 2024).

Düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin küçük ölçekli tarımda yaygınlaştırılmasının önündeki en önemli engellerden biri, kullanıcı kaynaklı zorluklardır. Küçük  l ekli üreticilerin önemli bir kısmı ileri düzey teknik bilgiye sahip değildir ve yeni teknolojilere karşı temkinli bir yaklaşım sergileyebilmektedir. Bu durum, otomasyon sistemlerinin benimsenmesini ve etkin kullanımını sınırlayabilmektedir. Kullanıcı eğitimi eksikliği, sistemlerin yanlış kurulmasına veya hatalı kullanılmasına neden olabilmektedir. Bu tür durumlar, beklenen faydanın elde edilememesine ve teknolojinin güvenilirliğine yönelik olumsuz algıların oluşmasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin yaygınlaştırılmasında teknik destek ve eğitim faaliyetleri büyük önem taşımaktadır (Baffoe-Asare, 2013; Yeo & Keske, 2024).

Sosyo-ekonomik faktörler de uygulamadaki zorluklar arasında yer almaktadır. Küçük  l ekli tarım işletmelerinde kısa vadeli gelir beklentileri ön planda olduğundan, uzun vadeli fayda sağlayan teknolojik yatırımlar ikinci planda kalabilmektedir. Ayrıca finansman olanaklarının sınırlı olması, bazı üreticiler için düşük maliyetli sistemleri dahi erişilemez hale getirebilmektedir.

Sonuç

Bu kitap bölümünde, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin küçük ölçekli tarımsal alanlara uygulanabilirliği; teknik, ekonomik ve uygulamaya yönelik boyutlarıyla bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Küresel ölçekte artan nüfus, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkileri ve doğal kaynaklar üzerindeki baskının giderek artması, tarımsal üretim sistemlerinde verimliliğin ve kaynak kullanım etkinliğinin artırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda küçük ölçekli tarım işletmelerinin sürdürülebilirliği, yalnızca üretim miktarı açısından değil, aynı zamanda kırsal kalkınma, gıda güvenliği ve çevresel denge açısından da stratejik bir öneme sahiptir.

Bölüm kapsamında yapılan değerlendirmeler, yüksek maliyetli ve karmaşık yapıya sahip ticari otomasyon sistemlerinin küçük ölçekli tarım işletmeleri için çoğu durumda ekonomik ve teknik açıdan uygulanabilir olmadığını göstermektedir. Buna karşılık açık kaynaklı donanım ve yazılım bileşenlerine dayalı, kademeli olarak geliştirilebilir ve farklı üretim ölçeklerine uyarlanabilir düşük maliyetli otomasyon sistemleri; küçük üreticilerin ihtiyaçlarıyla daha uyumlu çözümler sunmaktadır. Literatürlerde yer alan bulgular, bu sistemlerin özellikle sulama otomasyonu başta olmak üzere sera üretimi ve açık alan tarımında su ve enerji kullanımını optimize ederek üretim verimliliğini artırabildiğini ortaya koymaktadır.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin düşük ilk yatırım maliyetleri, kısa geri ödeme süreleri ve sınırlı bakım gereksinimleri sayesinde küçük ölçekli tarım işletmeleri için erişilebilir bir yatırım alternatifi bulunduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte bu ekonomik avantajların, sistemlerin doğru tasarlanması, uygun şekilde kurulması ve düzenli bakım uygulamalarıyla desteklenmesi durumunda sürdürülebilir hale gelebildiği görülmektedir. Bu durum, ekonomik

uygulanabilirliğin teknik performans ve kullanıcı etkileşimi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Teknik uygulanabilirlik açısından bakıldığında, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin saha koşullarında güvenilir biçimde çalışabilmesi; sensör doğruluğu, donanım dayanıklılığı, enerji altyapısı ve iletişim olanakları gibi unsurlara bağlıdır. Özellikle açık alan tarımında karşılaşılan değişken çevresel koşullar, sensör kalibrasyonu ve sistem dayanıklılığı konularını daha da önemli hale getirmektedir. Literatürde, uygun kalibrasyon, periyodik bakım ve yerel koşullara uyarlanmış sistem tasarımları ile düşük maliyetli bileşenlerin tarımsal uygulamalar için yeterli doğruluk ve güvenilirlik düzeyine ulaşabildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte teknik bilgi düzeyi sınırlı kullanıcı grupları göz önüne alındığında, sistemlerin sade, kullanıcı dostu ve bakım gereksinimi düşük olacak şekilde tasarlanması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Bu bölümde sunulan değerlendirmeler, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin küçük ölçekli tarımda tek başına bir çözüm olarak değil, entegre bir üretim yönetimi yaklaşımının parçası olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Teknolojik altyapının yanı sıra kullanıcı eğitimi, yayım hizmetleri ve yerel destek mekanizmaları, bu sistemlerin etkinliğini ve benimsenme düzeyini belirleyen temel faktörlerdir. Dolayısıyla otomasyon teknolojilerinin yaygınlaştırılmasında yalnızca teknik geliştirmelere odaklanmak yeterli olmayıp, sosyo-ekonomik koşulların ve üretici profillerinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Türkiye koşulları özelinde değerlendirildiğinde, küçük ve parçalı arazi yapısı, artan su stresi ve iklim değişikliğine bağlı üretim riskleri, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinin önemini daha da artırmaktadır. Bu sistemler, uygun politika araçları, eğitim programları ve destek mekanizmalarıyla birlikte ele alındığında, küçük ölçekli tarım işletmelerinin üretim verimliliğini artırma ve

dijital tarım uygulamalarının daha kapsayıcı biçimde yaygınlaşmasını sağlama potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, düşük maliyetli otomasyon sistemleri; küçük ölçekli tarımsal üretimde kaynak kullanım etkinliğinin artırılması, üretim süreçlerinin daha kontrollü hale getirilmesi ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının desteklenmesi açısından önemli bir araç olarak değerlendirilebilir. Gelecekte bu sistemlerin gelişmiş karar destek mekanizmaları ve veri temelli yaklaşımlarla bütünleştirilmesi, biyosistem mühendisliği disiplininin sunduğu mühendislik çözümleri ile küçük ölçekli tarımın dayanıklılığını ve rekabet gücünü artıracak önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Kaynakça

Abba, S., Wadumi Namkusong, J., Lee, J.-A., & Liz Crespo, M. (2019). Design and Performance Evaluation of a Low-Cost Autonomous Sensor Interface for a Smart IoT-Based Irrigation Monitoring and Control System. *Sensors* (Basel, Switzerland), 19(17), 3643. <https://doi.org/10.3390/s19173643>

Aguado, A., González-Colom, R., Rodríguez-Sufuentes, S., Rodríguez-López, A., Figols, M., Gómez-López, A., Badyda, A., Dalheimer, J., Feroso, J., & Verdugo, F. (2025). Verification and Usability of Indoor Air Quality Monitoring Tools in the Framework of Health-Related Studies. *Air*, 3(1), 3. <https://doi.org/10.3390/air3010003>

Alazzai, W. K., Obaid, M. K., Abood, B. Sh. Z., & Jasim, L. (2024). Smart Agriculture Solutions: Harnessing AI and IoT for Crop Management. *E3S Web of Conferences*, 477, 00057. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447700057>

Aryanfar, Y., Khosravi, A., Alcaraz, J. L. G., Assad, M. E. H., Atique, R. S. M., Alayi, R., & Sharma, S. (2022). Energy, exergy and economic analysis of combined solar ORC-VCC power plant. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 196–205. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab099>

Ashoka, P., Devi, B. R., Sharma, N., Behera, M., Gautam, A., Jha, A., & Sinha, G. (2024). Artificial intelligence in water management for sustainable farming: a review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 511-525.

Awais, M., Mahum, R., Zhang, H., Zhang, W., M Metwally, A. S., Hu, J., & Arshad, I. (2024). Short-term photovoltaic energy generation for solar powered high efficiency irrigation systems using LSTM with Spatio-temporal attention mechanism. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60672-9>

Ayompe, L. M., Masso, C., Acobta, A. N., Egoh, B. N., & Nkongho, R. N. (2025). Transforming palm oil production: sustainable techniques and waste management strategies for Cameroon's smallholder farmers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1606323>

Baffoe-Asare, R. (2013). Socioeconomic Factors Influencing Adoption of Codapec and Cocoa High-tech Technologies among Small Holder Farmers in Central Region of Ghana. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 277–292. <https://doi.org/10.9734/ajea/2013/1969>

Bazaluk, O., Nitsenko, V., Havrysh, V., Lavrenko, S., & Mazur, Y. (2022). Low-Cost Smart Farm Irrigation Systems in Kherson Province: Feasibility Study. *Agronomy*, 12(5), 1013. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051013>

Bekmuratov, A., Mamashov, K., Raimberdiev, B., Tookeyeva, D., & Myrzaibraimova, I. (2024). Impact of leasing transactions on business development in Kyrgyzstan. *Scientific Bulletin of Mukachevo State University Series "Economics,"* 11(3), 21–33. <https://doi.org/10.52566/msu-econ3.2024.21>

Bersani, C., Zero, E., Ouammi, A., & Sacile, R. (2020). Model Predictive Control of Smart Greenhouses as the Path towards Near Zero Energy Consumption. *Energies*, 13(14), 3647. <https://doi.org/10.3390/en13143647>

Borges, R. C., Dourado, V. C., Beuter, C. H., & Bento, M. E. C. (2024). Internet of Things Application in an Automated Irrigation Prototype Powered by Photovoltaic Energy. *Energies*, 17(9), 2219. <https://doi.org/10.3390/en17092219>

Carrasco, G., Fuentes-Peñailillo, F., Manríquez, P., Urrestarazu, M., Vega, R., Gutter, K., & Rebolledo, P. (2024). Enhancing Leafy Greens' Production: Nutrient Film Technique Systems and

Automation in Container-Based Vertical Farming. *Agronomy*, 14(9), 1932. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091932>

Chai, Q., Wang, Y., Nemecek, T., Zhao, C., Liang, C., Gan, Y., Yu, A., Hu, F., Wang, L., Siddique, K. H. M., & Coulter, J. A. (2021). Integrated farming with intercropping increases food production while reducing environmental footprint. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(38). <https://doi.org/10.1073/pnas.2106382118>

Chughtai, O., Qadri, N. N., Yuen, C., & Kaleem, Z. (2024). Drone-Assisted Cooperative Routing Scheme for Seamless Connectivity in V2X Communication. *IEEE Access*, 12, 17369–17381. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3359273>

Dankan Gowda, V., Sandeep Prabhu, M., Samal, A., Kudari, J. M., & Ramesha, M. (2021). Smart Agriculture and Smart Farming using IoT Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2089(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2089/1/012038>

Daraz, U., Khan, Y., & Bojnec, Š. (2025). Energy-Efficient Smart Irrigation Technologies: A Pathway to Water and Energy Sustainability in Agriculture. *Agriculture*, 15(5), 554. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050554>

Dhillon, R., & Moncur, Q. (2023). Small-Scale Farming: A Review of Challenges and Potential Opportunities Offered by Technological Advancements. *Sustainability*, 15(21), 15478. <https://doi.org/10.3390/su152115478>

Escribà-Gelonch, M., Liang, S., Van Schalkwyk, P., Fisk, I., Long, N. V. D., & Hessel, V. (2024). Digital Twins in Agriculture: Orchestration and Applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(19), 10737–10752. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01934>

- Ferrarezi, R. S., Van Iersel, M. W., & Dove, S. K. (2015). An Automated System for Monitoring Soil Moisture and Controlling Irrigation Using Low-cost Open-source Microcontrollers. *HortTechnology*, 25(1), 110–118. <https://doi.org/10.21273/horttech.25.1.110>
- Fuentes-Peñailillo, F., Vega, R., Silva, G. C., & Gutter, K. (2024). Transformative Technologies in Digital Agriculture: Leveraging Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Smart Crop Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(4), 39. <https://doi.org/10.3390/jsan13040039>
- Gyamfi, E. K., Elsayed, Z., Kropczynski, J., Yakubu, M. A., & Elsayed, N. (2024). Agricultural 4.0 Leveraging on Technological Solutions: Study for Smart Farming Sector. 22, 1–9. <https://doi.org/10.1109/icmi60790.2024.10585910>
- Haq, E. S., Aji, A. A., Yusuf, D., Rini, E. M., & Setiadevi, S. (2023). Investigating an Enhanced Approach for Greenhouse Climate Control: Optimising Cooling and Heating Systems. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 13(6), 2388–2396. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.13.6.19384>
- Hussein, A. H. A., Mohammed, A., Jabbar, K. A., & Jasim, L. (2024). Harvesting the Future: AI and IoT in Agriculture. *E3S Web of Conferences*, 477, 00090. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447700090>
- Indurthi, S., Vinod, D. V., & Sarma, I. (2024). Horticultural Innovations Elevating Crop Yields and Agricultural Sustainability for a Flourishing Future. *PLANT CELL BIOTECHNOLOGY AND MOLECULAR BIOLOGY*, 25(1–2), 22–44. <https://doi.org/10.56557/pcbmb/2024/v25i1-28560>

Issa, A. A., Abdul Ameer, S., Majed, S., & Al-Jawahry, H. M. (2024). Farming in the Digital Age: Smart Agriculture with AI and IoT. *E3S Web of Conferences*, 477, 00081. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447700081>

Jafri, S. H., Adnan, K. M. M., Osei, E., Baimbill Johnson, S., Yu, M., & Talukder, A. A. (2024). Challenges and Solutions for Small Dairy Farms in the U.S.: A Review. *Agriculture*, 14(12), 2369. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122369>

Janni, M., Marmioli, M., Marmioli, N., Maestri, E., & Gulli, M. (2024). Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: a critical review. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1297569>

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 3, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>

Jiang, B., Tang, W., Deng, X., & Cui, L. (2023). Precision Livestock Farming Research: A Global Scientometric Review. *Animals*, 13(13), 2096. <https://doi.org/10.3390/ani13132096>

Kaur, A., Raja, L., & Bhatt, D. P. (2024). Developing a Hybrid Irrigation System for Smart Agriculture Using IoT Sensors and Machine Learning in Sri Ganganagar, Rajasthan. *Journal of Sensors*, 2024, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2024/6676907>

Kojima, Y., Shigeta, R., Miyamoto, N., Shirahama, Y., Nishioka, K., Mizoguchi, M., & Kawahara, Y. (2016). Low-Cost Soil Moisture Profile Probe Using Thin-Film Capacitors and a Capacitive Touch Sensor. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(8), 1292. <https://doi.org/10.3390/s16081292>

Kumar, V., Singh, C. D., Rao, R., Rajwade, Y. A., Kumar, M., & Asha, K. R. (2024). Development and Evaluation of Smart Drip

Irrigation System for Egg Plant using Internet of Things. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 83(3). <https://doi.org/10.56042/jsir.v83i3.2471>

Lascano-Rivera, S. B., Balarezo-Urresta, L. R., Rivera-Escriba, L. A., & Castañeda-Albán, J. E. (2025). Sensores inteligentes y técnicas de machine learning para la detección del estrés en ganado bovino. *Innova Science Journal*, 3(3), 336–355. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n3/64>

Lee, M.-H., Chang, F.-J., Yao, M.-H., Kow, P.-Y., & Kuo, B.-J. (2024). An Artificial Intelligence-Powered Environmental Control System for Resilient and Efficient Greenhouse Farming. *Sustainability*, 16(24), 10958. <https://doi.org/10.3390/su162410958>

Li, S., Zhuang, Y., Liu, H., Wang, Z., Zhang, F., Lv, M., Zhai, L., Fan, X., Niu, S., Chen, J., Xu, C., Wang, N., Ruan, S., Shen, W., Mi, M., Wu, S., Du, Y., & Zhang, L. (2023). Enhancing rice production sustainability and resilience via reactivating small water bodies for irrigation and drainage. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39454-w>

Madushanki, A. A. R., N, M., A, W., & Syed, A. (2019). Adoption of the Internet of Things (IoT) in Agriculture and Smart Farming towards Urban Greening: A Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(4). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0100402>

Mahajan, S. (2022). Design and development of an open-source framework for citizen-centric environmental monitoring and data analysis. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18700-z>

Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J.-H. (2025). Integration of smart sensors and IOT in precision

agriculture: trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>

Marshall, A., Turner, K., Richards, C., Foth, M., & Dezuanni, M. (2022). Critical factors of digital AgTech adoption on Australian farms: from digital to data divide. *Information, Communication & Society*, 25(6), 868–886. <https://doi.org/10.1080/1369118x.2022.2056712>

Misra, N. N., Martynenko, A., Al-Mallahi, A., Upadhyay, R., Dixit, Y., & Bhullar, M. S. (2022). IoT, Big Data, and Artificial Intelligence in Agriculture and Food Industry. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(9), 6305–6324. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2998584>

Mollet, M., Varley, C., Ndlovu, N., Kafunah, J., Quiroz, L. F., Kharkar, S., Leiva, S., Johnston, A., Mckeown, P. C., Brychkova, G., McLoughlin, M.-E., Murray, U., Spillane, C., Firestine, A., & O'Farrell, J. (2025). Digital technologies to accelerate the impact of climate smart agriculture by next-generation farmers in Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1462328>

Monamodi, P., Ndoro, J. T., & Matiwane, M. B. (2025). The Impact of Innovative Irrigation System Use on Crop Yield Among Smallholder Farmers in Mbombela Local Municipality, South Africa. *Agriculture*, 15(16), 1755. <https://doi.org/10.3390/agriculture15161755>

Noack, F., & Larsen, A. (2019). The contrasting effects of farm size on farm incomes and food production. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2dbf>

Ojha, R., Manvir, M., Kaundal, M., & Fayaz, A. (2025). Smart Irrigation Systems Using the Internet of Things: Applications in Farming Systems. *Journal of Advances in Biology &*

Biotechnology, 28(8), 361–376.
<https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i82712>

Padhiary, M., Sahu, B., Roy, P., & Dey, P. (2024). Harnessing AI for Automated Decision-Making in Farm Machinery and Operations (pp. 249–282). Igi Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6230-3.ch008>

Pierre, N., Theogene, H., Schadrack, N., Lambert, U., Ishimwe Viviane, I. V., Shadrack, I., Erneste, B., Francois, K., Viviane, I., & Alexis, N. (2023). AI Based Real-Time Weather Condition Prediction with Optimized Agricultural Resources. *European Journal of Technology*, 7(2), 36–49.
<https://doi.org/10.47672/ejt.1496>

Reddy, K. S., Tyagi, A. K., & Ahmad, S. S. (2024). Artificial Intelligence and the Internet of Things-Enabled Smart Agriculture for the Modern Era (pp. 68–99). Igi Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5266-3.ch004>

Reddy, V. S., Harivardhagini, S., & Sreelakshmi, G. (2024). IoT and Cloud Based Sustainable Smart Irrigation System. *E3S Web of Conferences*, 472, 01026.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447201026>

Rehman, A., Kashif, M., Bahaj, S. A., Fati, S. M., Saba, T., & Chaudhry, H. (2022). A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in Smart Agriculture. *Agronomy*, 12(1), 127. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010127>

Riahi, J., Vergura, S., Nasri, H., & Mami, A. (2024). Effectiveness of the Fuzzy Logic Control to Manage the Microclimate Inside a Smart Insulated Greenhouse. *Smart Cities*, 7(3), 1304–1329. <https://doi.org/10.3390/smartcities7030055>

Ribeiro, G. B. D. D., Miranda, E. L., Rodrigues, P. D., Bastos, R. C., Da Cunha, F. F., Aleman, C. C., & De Loreto, M. D. D. S. (2024).

The Use of Financial Tools in Small-Scale Irrigated Crops to Assess Socioeconomic Sustainability: A Case Study in Tocantins-Araguaia Basin, Brazil. *Sustainability*, 16(5), 1835. <https://doi.org/10.3390/su16051835>

Ritambara, R., Shubham, S., & Kaushal, S. (2024). Frontiers of Artificial Intelligence in Agricultural Sector: Trends and Transformations. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(10), 970–980. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i102518>

Robles Algarín, C., Callejas Cabarcas, J., & Polo Llanos, A. (2017). Low-Cost Fuzzy Logic Control for Greenhouse Environments with Web Monitoring. *Electronics*, 6(4), 71. <https://doi.org/10.3390/electronics6040071>

Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*, 17(6), 063008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408>

Saban, M., Aghzout, O., & Rosado-Munoz, A. (2022). Deployment of a LoRa-based Network and Web Monitoring Application for a Smart Farm. 424–427. <https://doi.org/10.1109/metroind4.0iot54413.2022.9831521>

Safdar, M., Shahid, M. A., Yang, C., Raza, A., Tahir, M., Rasul, F., & Sabir, R. M. (2024). Climate Smart Agriculture and Resilience (pp. 28–52). Igi Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-4864-2.ch002>

Sharma, A., Arya, V., Singh, S. K., Gupta, B. B., Thakur, R., & Kumar, S. (2024). IoT-enabled smart farming with Industry 5.0. *Journal of High Speed Networks*, 30(3), 477–496. <https://doi.org/10.3233/jhs-230258>

Shi, B., Catsamas, S., Kolotelo, P., Wang, M., Lintern, A., Jovanovic, D., Bach, P. M., Deletic, A., & Mccarthy, D. T. (2021).

A Low-Cost Water Depth and Electrical Conductivity Sensor for Detecting Inputs into Urban Stormwater Networks. *Sensors* (Basel, Switzerland), 21(9), 3056. <https://doi.org/10.3390/s21093056>

Solomon, R., Zaitchik, B. F., & Simane, B. (2021). The Impact of Climate Change on Agriculture Production in Ethiopia: Application of a Dynamic Computable General Equilibrium Model. *American Journal of Climate Change*, 10(01), 32–50. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2021.101003>

Taneja, K., & Bhatia, S. (2017). Automatic irrigation system using Arduino UNO. 132–135. <https://doi.org/10.1109/iccons.2017.8250693>

Tavan, M., Brodie, G., Fuentes, S., Gupta, D., Pang, A., & Wee, B. (2021). Optimizing Sensor-Based Irrigation Management in a Soilless Vertical Farm for Growing Microgreens. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.622720>

Touil, S., Skarmeta Gómez, A. F., Richa, A., Argente García, J. E., & Fizir, M. (2022). A review on smart irrigation management strategies and their effect on water savings and crop yield. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1396–1416. <https://doi.org/10.1002/ird.2735>

Van Loon, J., Govaerts, B., Gabarra, L., & Speratti, A. (2018). Precision for Smallholder Farmers: A Small-Scale-Tailored Variable Rate Fertilizer Application Kit. *Agriculture*, 8(4), 48. <https://doi.org/10.3390/agriculture8040048>

Voicea, I., Nenciu, F., Matache, M.-G., Persu, C., Cujbescu, D., & Vlăduț, N.-V. (2024). Exploring a Self-Sufficiency Approach within a Sustainable Integrated Pisciculture Farming System. *Sustainability*, 16(18), 8055. <https://doi.org/10.3390/su16188055>

Wilk, J., Andersson, L., & Warburton, M. (2012). Adaptation to climate change and other stressors among commercial and small-

scale South African farmers. *Regional Environmental Change*, 13(2), 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0323-4>

Williams, P. A., Crespo, O., & Abu, M. (2019). Adapting to changing climate through improving adaptive capacity at the local level – The case of smallholder horticultural producers in Ghana. *Climate Risk Management*, 23, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.12.004>

Xie, L., Zhong, W., & Luo, B. (2021). How Are Smallholder Farmers Involved in Digital Agriculture in Developing Countries: A Case Study from China. *Land*, 10(3), 245. <https://doi.org/10.3390/land10030245>

Yeo, M. L., & Keske, C. M. (2024). From profitability to trust: factors shaping digital agriculture adoption. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1456991>

Zerssa, G., Eichler-Löbermann, B., Kim, D.-G., & Feyssa, D. (2021). Challenges of Smallholder Farming in Ethiopia and Opportunities by Adopting Climate-Smart Agriculture. *Agriculture*, 11(3), 192. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030192>

Zhang, J., Jiang, C., Kimm, H., Caylor, K., Heeren, D. M., Rudnick, D. R., Yang, Y., Cai, Y., Gates, J., Peng, B., Khanna, M., Guan, K., Pan, M., Zhou, W., Good, S., Abimbola, O., & Franz, T. E. (2021). Challenges and opportunities in precision irrigation decision-support systems for center pivots. *Environmental Research Letters*, 16(5), 053003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe436>

BÖLÜM 5

FARKLI ALTLIK MALZEMELERİNİN BROYLER YETİŞTİRİCİLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİ

HASAN ÖZ¹

Giriş

Etlik tavuk (broyler) türlerinin yetiştiriciliği, dünya genelinde hem yaygın olarak uygulanmakta hem de ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Kullanılan altlık çeşitleri; etlik tavukların sağlığı, gelişim hızı, yemden yararlanma kapasitesi, et kalitesi ve hayvan refahı üzerinde doğrudan etkilidir.

Dünya nüfusunun hızla artması ve yaşam kalitesindeki yükselişe paralel olarak gıda ihtiyacı da önemli ölçüde artmıştır; bu durum, yeterli, dengeli ve sağlıklı beslenmeyi günümüzde temel sorunlardan biri haline getirmiştir. Hayvansal protein kaynakları, bitkisel olanlara kıyasla daha yüksek biyolojik değere sahiptir. İnsan sağlığı açısından büyük öneme sahip olan hayvansal ürünlerin düzenli tüketimi, sağlıklı ve dengeli bir fizyolojik gelişim için zorunludur. Artan nüfusun protein talebini en hızlı şekilde ve basit bir üretim modeline sahip olduğu için broyler (etlik piliç) yetiştiriciliği karşılamaktadır. Özellikle kısa üretim süresi, yüksek

¹ Prof. Dr., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi,
Orcid: 0000-0002-7135-1372

yem dönüşüm oranı ve karkasa çabuk gelmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Broyler cinsi yumurtadan çıktıktan ortalama 45-50 gün sonra kesime hazırdır. Tavukların hızlı büyümesi için protein, enerji (karbonhidrat) ve mineral içeriğine sahip yemler kullanılmaktadır. Yem içeriği, et kalitesini, büyüme hızını ve pigmentasyonu doğrudan etkilemektedir.

Tavukların sağlıklı büyüebilmesi için nem, sıcaklık, havalandırma gibi uygun ortam koşulları sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar, hayvanların strese girmemesi ve mantar (fungal), bakteriyel ya da fizyolojik kaynaklı hastalıklardan korunması açısından önemlidir. Kalabalık üretim sistemleri, hastalıkların yayılma riskini artırdığı için üreticiler üzerinde dikkatle durması gereken konulardandır (Boz & ark.,2020).

Tavuk dışkılarıyla atılan ürik asit, çevresel faktörlerin etkisiyle amonyağa dönüşmektedir. Bu dönüşüm süreci; ortam sıcaklığı, nem düzeyi, havalandırma durumu, altlık nem oranı, dışkı miktarı, mevsimsel değişiklikler, altlığın pH seviyesi ve altlık mikroflorası gibi değişkenlere bağlı olarak şekillenmektedir. Altlık pH'sı 7'nin altına indiğinde amonyak oluşumu sınırlanırken, 8'in üzerindeki değerlerde üretim hızı artar. Cıvcivler bu gazın etkilerine karşı oldukça hassastır; 5 ppm gibi düşük seviyelerde dahi, koku fark edilmese bile, amonyak solunum yollarında tahrişe yol açabilir. Amonyak seviyesi 20 ppm'ye ulaştığında koku hissedilmeye başlar, 25 ppm düzeyine çıktığında ise büyüme geriler ve solunum sistemi enfeksiyonlarıyla birlikte hava kesesi iltihapları ortaya çıkabilir. 50–100 ppm aralığında bulunan amonyak, insan gözüne zarar verecek düzeyde yakıcı etkiler gösterir. Bu durum tavuklarda keratokonjonktivit ve körlük gibi ciddi göz problemlerine yol açabilir. Genel olarak yüksek amonyak seviyesi; yem tüketiminde azalma, kilo artışında gerileme, enfeksiyon riskinde artış, karkas kalitesinin düşmesi ve hayvan refahının bozulması gibi birçok olumsuzluğu beraberinde getirmektedir (Atasoy, 2000)

Altlık Malzemelerinin Özellikleri

Yer tavukçuluğunda tavukların doğal davranışlarından eşelenme eylemini gerçekleştirebilmesi için aynı zamanda zemin ve hayvan arasında bir yalıtım olarak zemine, sıkıştırılabilir, suyu emebilen, kuru, kokusuz ve toz içermeyen bir madde serilir. İyi bir altlık, orta irilikte, sert ve keskin olmamalıdır. İnce taneli altlıklar hayvanların ayakları altında ezilerek veya hareketleri esnasında uçuşarak solunması durumunda hayvanların solunum yollarının tahriş olmasına neden olmaktadır. Nitekim sert, keskin ve sivri altlık malzemeleri de hayvanlarda ayak yaralanmalarına neden olurken aynı zamanda yemle birlikte yutulması durumunda sindirim sistemine zarar verebilmektedir. Isı geçirgenliği az, yüksek nem tutma kapasitesi ve kolay kuruyabilen malzemeden oluşmalıdır. Altlık herhangi bir kimyasal veya ilaçla temas etmemiş veya karışmamış olmalıdır. Bununla birlikte altlık malzemesi içerisinde bit, pire, akar gibi insektlerden arınmış olmalıdır. Tüm bunlarla birlikte altlık malzemesi düşük maliyetli, taşınması ve depolanması rahat ve ulaşılabilir olmalıdır (Atasoy, 2000).

Tavuk yetiştiriciliğinde en çok altlık olarak kaba odun talaşı kullanılır. Lakin kaba odun talaşı iyi bir yalıtım malzemesi olsa da broyler yetiştiriciliğinin yoğun olarak yapıldığı bölgelerde teminatı zorlaşmıştır. Yapılan araştırma en iyi altlık alternatif olarak samanın talaşa benzer nitelikte olduğunu göstermiştir. Altlık olarak kullanılacak en iyi saman buğday samanıdır. Doğranmış saman, ezilmiş samana kıyasla daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır. Bunun yanı sıra emiciliğinin düşük olması olumsuz yanlarındandır. Kağıt kırpıntıları (kullanılmış gazete ve matbaa atıkları), küflenme ihtimalinin az olması, kolay ulaşılabilir olması nedeniyle tercih edilir. Bunlarla birlikte, parçalanmış mısır koçanı, taze fındık kabuğu, sert çam kabuğu organik olarak ve diatomit inorganik madde olarak alternatif seçenek olarak kullanılmaktadır (Atasoy, 2000).

Kullanılan Altlık Malzemeleri ve Özellikleri

Ahşap Talaşı

Genel olarak en iyi altlık çam, ladin gibi yumuşak ağaçlardan elde edilen odun talaşıdır. Ancak bu malzeme, son birkaç yılda talepteki yüksek artış nedeniyle kümes hayvanları barınaklarında altlık olarak kullanmak için pahalı hale gelmiştir. Ahşap talaşı, su tutma kapasitesi yüksek, ısı yalıtımı iyi, toz oluşumu düşük parçalanma hızı yavaş teknik özelliklere sahiptir. Ahşap talaşının avantajlı yönleri olarak, ayak sağlığı açısından uygun, amonyak oluşumu kontrollü ve serme temizlemesi kolay olduğundan en yaygın ve güvenilir altlık türüdür.

Çam Kabuğu

Çam kabuğu, ahşap endüstrisinin bir yan ürünüdür ve bazı yerlerde büyük miktarlarda mevcuttur. Etlik piliç üretiminde, çam kabuğunun ahşap talaşı kadar etkili olduğu belirlenmiştir. Çam kabuğu ayrıca yumurtacı tavuklar, genç tavuk yetiştiriciliğinde, iri etlik tavuklar, damızlık piliç yetiştiriciliğinde ve kısırlaştırılmış horozlar için de başarıyla kullanılmıştır. Kabuk üzerinde yetiştirilen tavuklar, talaş üzerinde yetiştirilenler kadar iyi performans göstermiştir. Ancak, parçacık boyutu, nem oranı (küf oluşumunu etkiler) ve kabuktaki odun kıymığı sayısı önemli sorunlara yol açabilmektedir.

Ahşap Palet Parçaları

Depolama ve nakliye sektörlerinde kullanılan ahşap paletler küçük parçalara ayrılarak kümes hayvanları için altlık malzemesi olarak geri dönüştürülerek kullanılma uygulamaları da mevcuttur. Ahşap paletlerin geri dönüştürülmesinden elde edilen ticari bir ürün olan ahşap lif peletlerinin iyi bir altlık malzemesi olduğu belirlenmiştir. Ancak dezavantaj olabilecek önemli husus ise, ahşap paletlerin toksik maddeler içeriyor olabilesidir. Bazı ahşap paletler

boya, yakıt, pestisit, çözücü ve diğer yanıcı maddelerle kirlenmiş olabilir.

Kağıt Yan Ürünleri

Parçalanmış kağıt alternatif bir altlık malzemesi olarak kullanılmaktadır; ancak kullanımın ilk iki haftasında sıkışma eğilimi göstererek etkinliği azalmaktadır. Sadece eski gazeteler tercih edilmelidir çünkü bazı baskı mürekkepleri tamamen kuruyana kadar toksik etki gösterebilir. Parlak (kuşe) kâğıt ise kullanılmamalıdır. Çünkü nemi emme etkinlikleri düşüktür. Su tutma özelliği yüksek, yavaş kuruma ve çok hızlı parçalanma özelliğine sahiptir. Avantajlı yönleri, geri dönüşüme katkı sunarken, nem tutma kapasitesi yüksektir. Dezavantajlı yönleri ise, hızla çamurlaşma göstermesi, koku problemi ve bakteriyel gelişime uygun olması sayılabilir.

Pirinç Kabuğu

Pirinç kabukları, ülkenin bazı bölgelerinde kolaylıkla bulunabilmekte olup, altlık malzemesi olarak kullanıldığında tavukların iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Pirinç kabukları genellikle aşırı toz içermez ve boyutları, ısı iletkenliği ile kuruma hızı onları altlık için iyi bir seçenek haline getirmektedir. Pirinç kabukları tek başına ya da çam talaşı ile karıştırılarak kullanılabilir. Su tutma kapasitesi orta, kuruma hızı yüksek, toz tutma düşük ve parçalanma oranı orta düzeyde teknik özelliklere sahiptir. Hafif ve yumuşak yapıda olup, düşük amonyak oluşumu ve ayak sağlığına uygunluğu avantajlı olarak ön plana çıkarırken taşıma maliyetinin yüksekliği ve ülkemizin her bölgesinde kolaylıkla bulunamaması dezavantajlı noktalar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Öğütülmüş Mısır Koçanı

Mısır koçanı, büyük miktarlarda mısır üretilen bölgelerde popüler bir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulamada mısır koçanları parçalanmalı ve boyutları bezelye tanesinden daha büyük

olmamalıdır. Parçalar çok uzun olduğu takdirde göğüs kabarcığı sorunu oluşturabilmektedir. Mısır koçanlarının nemi emme kapasitesi yüksek olmasına rağmen ıslak koçanlar küf problemi ortaya çıkarabilmektedir.

Doğranmış Saman

Doğranmış saman, tahıl üreten ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Saman; arpa, buğday vb., olmak üzere ot veya tahıllardan elde edilen sap malzemesidir. Buğday samanı, altlık malzemesi olarak en yaygın kullanılan türdür. Samanın altlık malzemesi olarak kullanılmasında; su tutma kapasitesi orta, ısı yalıtımı orta, toz oranı yüksek ve hızlı parçalanma özelliklerine sahiptir. Ucuz ve kolay temin edilmesi avantajlarının yanı sıra ıslanınca hızlı topaklanması, küf ve aflatoxin riskinin yüksek olması ile ayak tabanı yaralanmalarının daha sık gözlenmesi dezavantajlı kısımlarını ortaya çıkarmaktadır.

Altlıkların Hayvan Sağlığı Üzerine Etkileri

Altlıkların Amonyak ve pH Dengesi Üzerindeki Rolü

Kullanılan altlığın pH seviyesi genellikle 8 ile 10 arasında değişmekte olup, kuru durumda bu değer yaklaşık 7 civarındadır. pH değeri 9'un üzerine çıktığında, bakteriler için elverişli bir ortam oluşmakta ve bu durum bakterilerin çoğalmasını ve amonyak üretimini artırmaktadır. Ürikaz enzimi sentezleyen bu bakteriler, nemden yararlanarak ürik asidi amonyağa ve amonyuma; üreyi ise amonyak ile karbondioksit ayıştırmaktadır. Açığa çıkan amonyak (NH_3), uçucu özelliğe sahiptir ve genellikle altlık yüzeyinden 3–8 cm yukarıda yoğunlaşır; amonyum (NH_4^+) ise suda çözünür ve altlık içinde kalır. Kanatlı hayvanlar amonyak gazına oldukça duyarlıdır; yüksek konsantrasyona maruz kalmaları körlüğe ve performans kaybına yol açmaktadır. Amonyak seviyesinin 25 ppm'e ulaşması, hava kesesi enfeksiyonları ve viral hastalıklara zemin hazırlayarak

yaşama oranını, canlı ağırlık artışını ve yemden yararlanma verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Yüksek nemli altlık nedeniyle açığa çıkan amonyağın insan sağlığı üzerinde de etkileri vardır. İnsan burnu 15 ppm düzeyindeki amonyağı algılayabilirken, 50–100 ppm aralığında gözlerde yanma ve sulanma gibi rahatsızlıklar görülmektedir. Ayrıca, etlik piliçlerde gözlenen asidesin oluşumunun, kümes ortamındaki amonyak birikimiyle ilişkili olduğu bildirilmiştir (Şekeroğlu & ark., 2013).

Altlık Kaynaklı Cilt ve Solunum Sorunları

Altlıkta nem oranının aşırı yüksek olması, broylerde göğüs bölgesinde sıvı birikimi, deri tahrişi, kabuk oluşumu ve morarma gibi olumsuzluklara yol açarak karkas kalitesini düşürmektedir. Yüksek nem seviyeleri aynı zamanda bakteriyel enfeksiyonların gelişmesini kolaylaştırır ve bunun sonucunda topallık ile ayak tabanı lezyonları (footpad dermatitis) görülme riski artış göstermektedir. Footpad yangısı başlangıçta deride renk değişimi ve hyperkeratosis (aşırı keratinleşme) ile kendini gösterir ve zamanla açık yaralara dönüşmektedir. Bu durum hayvan refahı açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Altlıktan yayılan amonyak hem ortam havasının kirlenmesine hem de gübredeki azotun kaybıyla birlikte gübre değerinin azalmasına yol açar. Öte yandan, altlık materyalinin aşırı kuru olması toz oluşumunu artırarak civcivlerde dehidrasyon ve solunum yolu rahatsızlıklarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu tür olumsuzlukların önlenmesi için altlıkta ideal nem oranı %20–25 aralığında tutulması önerilmektedir (Şekeroğlu & ark., 2013).

Sönmüş Kireç Kullanımı ve Etkileri

Altlık kullanımında pH, amonyak, patojen ve aerobik ortam kontrolü için altlığa, altlık düzenleyici olarak sönmüş kireç ilave edilmektedir. Sönmüş kireç, altlıkta Salmonella yaşama oranını düşürür. Ancak yeni altlıkta aşırı kireç olması solunum yolları

rahatsızlıklarına ve göz tahrişine neden olabilmektedir (Şekeroğlu & ark., 2013).

Altlıkların Kemik Sağlığı Üzerine Etkileri

Etlik tavuklarda kemik sağlığı, yetiştirme ortamındaki altlık materyallerinin türüne ve kalitesine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Broyler yetiştiriciliğinde iskelet sistemi ile ilişkili sağlık sorunlarının görülme sıklığı oldukça yüksektir. Bu problemler, hayvanın yürüme ve hareket etme kabiliyetini azaltarak, daha fazla yatmasına ve dolayısıyla yem ile suya ulaşımını zorlaştırmasına neden olmaktadır. Bacaklardaki kas, kemik, eklem ve bu yapıları kontrol eden sinirlerin oluşturduğu sistemde meydana gelen işlev bozuklukları, iskelet gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir. Etlik piliçlerin hareketliliği, ışığın yoğunluğu, dalga boyu ve kaynağı gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir.

Altlık ve Kemik Biyomekaniği

Kemik gelişimi ve kırılma dayanıklılığı, farklı barınma sistemlerinden etkilenmektedir. Araştırmacılar; kafeste yetiştirilen tavukların humerus kemiğinin ağırlığında azalma olduğunu ancak tibiotarsus kemiğinin ağırlığının barınma sisteminden etkilenmediğini bildirmişlerdir. Ayrıca, kafeste yetiştirilen piliçlerin kanat kemiklerinin, derin altlıkta yetiştirilenlere göre daha düşük kırılma dayanıklılığına sahip olduğu bildirmişlerdir. Tibiotarsus kemiğinin kırılma dayanıklılığı ve ağırlığının genotip tarafından etkilenirken, barınma sisteminden etkilenmediği belirtilmiştir (Süzer & ark., 2019).

Altlık Kalitesi ve Bacak Sağlığı Parametreleri

Kanatlı endüstrisi için önemli bir refah sorunu bacak deformasyonları ve topallıktır. Topal kanatlıların acı çektiğini anlamak çok önemlidir. Bir sürüde topallığı değerlendirmek için yürüyüş skorlamasını kullanılır. Ayak yaraları ve kalça yanıkları

bacak bozukluklarıyla ilgilidir. Bacak sorunları olan tavuklar oturarak daha fazla zaman geçirir, altlık ıslak ve dışkıda kirliyse bu durum yanıklara ve yaralara neden olur. Ayak ve kalça yanıkları da yürümeyi ağırlı hale getirdiği için yürüme aktivitesini azaltır. Altlık alt tabakası, ölçülen bazı bacak zayıflığı endekslerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kontakt dermatit, bazı sürülerdeki tavukların çoğunu etkileyebilen 'nispeten yaygın' bir sorundur ve kalabalık, kısıtlı hareket, bacak zayıflığı ve düşük altlık kalitesi ile ilişkilidir. Altlık olarak kullanılan malzeme, kanatlıları kümes zeminindeki darbelerden ve sürtünmeden korumalıdır ve bu durum, görülme sıklığı altlık malzemesinin kalitesi ve miktarıyla yakından ilişkili olduğu için ayak yastığı lezyonları düşünüldüğünde özellikle önemlidir. Yüksek altlık nemi, malzemeyi sıkıştıran ıslanma ve kuruma döngülerine yol açarak etlik tavuklarda yanıklara ve ayak tabanı dermatitine neden olmaktadır. Bununla birlikte, dermatit insidansı, muhtemelen nem içeriğindeki farklılıklar nedeniyle altlık malzemeleri arasında önemli ölçüde etkilemektedir. Ayak pedi dermatiti, sırasıyla bacakların ve ayakların arkasında yüzeysel olabilen veya derin ülserlere ilerleyebilen lezyonlar, altlık kalitesinin bozulmasıyla dolaylı olarak da gelişebilir. Tavuklar ıslak altlıkta yattığında, çürüyen organik materyal tarafından üretilen amonyak deriyi tahriş etmektedir (Yıldız & ark., 2014).

Etlik piliçlerde altlık nemi ile ayak pedi dermatiti arasında doğrudan bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Yerleşim yoğunluğunun artmasıyla birlikte altlığın kalitesi düşmekte ve bu da ayak pedi sorunlarının daha sık görülmesine yol açmaktadır. Su tutma kapasitesi yüksek olan odun talaşı gibi altlık materyallerinin, saman gibi daha düşük emiciliğe sahip malzemelere göre daha kaliteli bir seçenek olduğu düşünülmektedir. Farklı yerleşim yoğunluğu ile saman ve talaş altlık kullanımı karşılaştırılmış; yerleşim yoğunluğunun ayak tabanı lezyonları üzerinde bir etkisi

bulunmazken, talaş kullanılan grupta bu sorunun daha az gözlemlendiği belirtilmiştir (Sarı & Saatçi, 2020).

Altlık Malzemesinin Performans ve Refah Üzerine Dolaylı Etkileri

Kaliteli bir altlık materyali; kuru, hijyenik, yüksek su emme kapasitesine sahip, mikroorganizmalara karşı dirençli, yumuşak yapılı ve kolay sıkıştırılabilir özellikte olmalıdır. Aynı zamanda hızlı kuruma özelliği taşınmalı, parçacık boyutu ne çok iri ne de çok ince olmalı, toksik etkisi bulunmamalı ve kimyasal maddeler ya da pestisitlerle kontamine olmamalıdır. Isı yalıtımı iyi, dışkı ile kolay karışabilen, kolay temin edilebilir ve ekonomik olması da önemli kriterlerdendir. Altlık materyalinden kaynaklanan amonyak buharlaşması, çevre havasını kirletmekte ve azot kaybına yol açarak gübrenin verimliliğini düşürmektedir. Aşırı ince yapılı altlıklar, barınakta hayvan hareketleriyle toz haline gelerek civcivlerde sıvı kaybına ve solunum yolu problemlerine neden olabilir. Ayrıca keskin, sert ya da sivri yapıdaki parçalar ayak tabanında yaralanmalara yol açabilirken; eşinme sırasında bu tür materyallerin yemle birlikte yutulması yemek borusu tahrişlerine sebep olabilir. Altlıkların parazit ya da bit gibi zararlılar içermemesi de hijyen açısından büyük önem taşımaktadır (Gençoğlu & Gençoğlu, 2017).

Etlik piliçler ve hindiler üzerinde gerçekleştirilen araştırmalarda, altlık materyalinin özelliklerinin (özellikle türü, parçacık boyutu ve nem düzeyi) ayak derisi hastalıklarının ortaya çıkmasında etkili faktörler arasında yer aldığı belirlenmiştir. Bu çalışmalarda, altlık parçacıklarının büyüklüğünün ayak tabanında lezyon oluşumu üzerinde doğrudan ve olumsuz bir etkiye sebep olduğu saptanmıştır (Gençoğlu & Gençoğlu, 2017).

Etlik piliçlerde ayak tabanı lezyonlarının, kış mevsiminde yaz aylarına kıyasla daha yaygın olarak görüldüğü saptanmıştır. Bu

durumun, barınak içindeki ve dışındaki bağıl nem oranlarının etkisiyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle kış aylarında dış ortam neminin yükselmesiyle birlikte pençelerdeki yaralanmaların sayısında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, kış döneminde yetiştirilen etlik tavuklarda diz bölgesine ait yaralanmaların, yaz aylarında yetiştirilenlere göre %28 oranında daha fazla olduğu bildirilmiştir (Gençoğlu & Gençoğlu, 2017).

De Jong & ark., (2014) yürüttükleri çalışmada, altlık nem içeriğindeki artışın yalnızca ayak tabanı lezyonlarının şiddetini artırmakla kalmadığını; aynı zamanda broyler performansı, karkas verimi ve genel refah düzeyini de olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir. Özellikle göğüs bölgesinin temizliği ve tahrişi, dizlerde yanık oluşumu ve yürüyüş davranışı gibi refah parametreleri, nem oranı fazla altlık koşullarında yetiştirilen etlik piliçlerde daha kötü sonuçlar ortaya koymuştur. Bu nedenle altlık nem seviyesinin düşük tutulması hem hayvan refahı hem de ekonomik verimlilik açısından önem taşımaktadır (Gençoğlu & Gençoğlu, 2017).

Yapılan çalışmalar, altlık seçiminin nem tutma kapasitesi, tane boyutu, ısı yalıtım derecesi, sivrilik, keskinlik, sertlik, kırılabilirlik ve toz oluşturma gibi birçok parametrenin etlik piliçlerin sağlık ve refahı üzerinde oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu parametreler ayak ve deri lezyonları, solunum yolu rahatsızlıkları, davranış bozuklukları ve stres gibi olumsuzlukların ortaya çıkmasında belirleyici rol oynamaktadır. Sonuç olarak altlık materyallerinin özellikleri, hayvanların verimini, büyüme hızlarını ve sağlıkları ile doğrudan ilişkilidir. Uygun altlık seçimi, refah düzeyini yükseltirken aynı zamanda ekonomik kayıpların azaltılmasını da sağlamaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışma, farklı altlık materyallerinin broyler tavuklarının refahı, performansı ve kemik biyomekaniği üzerindeki etkilerini

incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmada farklı altlık materyallerinin fiziksel özellikleri ve sınıflandırılması ele alınmış, talaş, odun yongaları, pirinç kabuğu, geri dönüştürülmüş kağıtlar gibi çeşitli altlık materyalleri ve sönmüş kireç altlık düzenleyicileri değerlendirilmiş, amonyak oluşumu, altlık nem oranı, karkas özellikleri, cilt ve solunum sorunları ve bacak sağlığı parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, altlık materyallerinin materyal cinsi, şekli, boyutu, uzunluğu, yalıtım kabiliyeti veya materyalin var olup olmayışı kümes hayvanlarında bacak, kas, kemik, eklem, ayak tabanı deri ve yemek borusu lezyonlarına sebep olacağını gösterirken; altlık kalitesinin, nem tutma kapasitesi, pH gibi sebeplerden dolayı amonyak, küf ve parazit oluşumuna bağlı, cilt lezyonları, solunum yolu tahribatı ve kemik sağlığı üzerinde önemli etkilere neden olduğunu göstermektedir.

Özellikle pirinç kabuğu ve talaş gibi materyallerin altlık neminin azaltılmasında, nem ve neme bağlı amonyak oluşumu nedeni ile cilt lezyonlarının önlenmesinde etkili olduğu belirtilmiştir. Geri dönüştürülmüş ve işlenmiş kağıt bazlı altlıklar ise çamurlaşma ve amonyak birikimi nedeniyle hayvanlar üzerinde deri, ayak tabanı ve solunum yollarında olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. Ahşap paletlerin ise geri dönüştürülebilir ve düşük maliyetli olmasından dolayı tercih edilse de toksik maddelerle karışmış olma ihtimali nedeniyle yetiştiriciler tarafından tercih edilmemektedir. Çam kütüğü yongalarında ise temel sorun olarak göğüs kabarcığı şikayeti görülmüştür.

Sonuç olarak, broyler yetiştiriciliğinde kullanılacak altlık materyalinin seçiminde; ekonomik açıdan ulaşılabilirliği, negatif mikrobiyal hareket yükünün az olduğu, nem ve amonyak emilimi, hayvanların hareket kabiliyetini kısıtlamadığı ve karkas kalitesini etkileyen faktörler dikkate alınmalıdır. Türkiye’de broyler üretiminin yoğun olduğu bölgelerde, yerel üreticileri rahatlatmak ve üretime teşvik amaçlı bölgelerine uygun mevcut materyallerle altlık

kaynaklarına ulaşımları maliyet durumuna uygun, ekonomik açıdan ulaşılabilir planlamalar yapılması önem taşımaktadır. Farklı iklim ve barınak koşullarında altlık performansını belirlemeye yönelik uygulama ve denemelerin artırılması, sektörde hayvan refahı ve verimi açısından faydalı olacaktır. Gelecekte, farklı genotip ve büyüme dönemlerine yönelik uzun süreli saha çalışmaları yapılması, altlık düzenleyici uygulamaların etkinliğinin karşılaştırılması ve alternatif materyallerin değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Kaynakça

Atasoy, F. (2000). Tavuk yetiştiriciliğinde altlığın kullanılması ve önemi. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 40(1), 90–97.

Boz, M. A., Erensoy, K., Uçar, A., & Sarıca, M. (2020). Kanatlı hayvan yetiştirme. *Akademisyen Yayınevi*.

De Jong, I. C., Gunnink, K., & Van Harn, J. (2014). Wet litter not only induces footpad dermatitis but also reduces overall welfare, technical performance, and carcass yield in broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*, 23:51–58.

Gençoğlu, S., & Gençoğlu, C. (2017). Altlık materyalinin etlik piliçlerin refah ve performansı üzerine etkisi. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(12), 1660–1667.

Sarı, M., & Saatçi, M. (2020). Etlik piliçlerde temel refah sorunları. *Academic Platform Journal of Halal Lifestyle*, 2(1), 23–35.

Süzer, B., Tüfekçi, K., Arıcan, İ., Petek, M., & Yıldız, H. (2019). Effects of genotype and housing system on some bone biomechanical characteristics in broiler chickens. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 66(3), 237–246.

Şekeroğlu, A., Eleroğlu, H., Sarıca, M., & Camcı, Ö. (2013). Yerde üretimde kullanılan altlık materyalleri ve altlık yönetimi. *Tavukçuluk Araştırma Dergisi*, 10, 25–34.

Yıldız, A., Yıldız, K., & Apaydın, B. (2014). The effect of vermiculite as litter material on some health and stress parameters in broilers. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 20(1), 129–134.

