TARIMSAL ÜRETİMDE SU YÖNETİMİ VE MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

Editör
Prof. Dr. Hasan ÖZ

BİDGE Yayınları

Tarımsal Üretimde Su Yönetimi ve Mühendislik Yaklaşımları

Editör: Prof. Dr. Hasan ÖZ

ISBN: 978-625-5057-22-8

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
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

Tarım sektörü, artan gıda gereksiniminin karşılanması, doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, iklim değişikliği, su kaynakları üzerindeki baskının artması ve tarımsal üretim maliyetlerinin yükselmesi, üretim süreçlerinde daha verimli, yenilikçi ve sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda bilimsel bilgi, mühendislik uygulamaları ve dijital teknolojilerin tarımsal üretim sistemlerine entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Tarımsal Üretimde Su Yönetimi ve Mühendislik Yaklaşımları başlıklı bu kitap, tarımsal üretimin farklı alanlarında karşılaşılan güncel sorunları ve bu sorunlara yönelik bilimsel çözüm yaklaşımlarını bir araya getirmektedir. Eserde; kümeslerde maksimum havalandırma gereksiniminin belirlenmesi, arazi toplulaştırması ile sulama altyapısının bütünleşik planlanması, sulama suyu ve hidrojen peroksit uygulamalarının bitkilere etkisi, iklim akıllı sulama yöntemleri ve dijital teknolojiler ile tarımsal su verimliliğini artırmaya yönelik akıllı ve hassas sulama uygulamaları ele alınmaktadır.

Kitapta incelenen konular, tarımsal üretimde kaynakların etkin kullanılması, üretim koşullarının iyileştirilmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi bakımından birbirini tamamlamaktadır. Su yönetimi ve akıllı sulama teknolojileri su kaynaklarının verimli kullanımına katkı sağlarken, arazi toplulaştırması ve sulama altyapısının bütünleşik planlanması tarımsal işletmelerin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir. Kümes havalandırma sistemleri ile bitkisel üretimde alternatif uygulamaların değerlendirilmesi ise mühendislik ve bilimsel araştırmaların tarımsal üretimdeki önemini ortaya koymaktadır.

Bu eserin; akademisyenlere, araştırmacılara, öğrencilere, ziraat mühendislerine ve tarımsal üretim alanında çalışan uzmanlara yararlı bir kaynak olması amaçlanmaktadır. Kitapta sunulan bilgi ve değerlendirmelerin yeni araştırmalara, yenilikçi uygulamalara ve sürdürülebilir tarım politikalarına katkı sağlamasını temenni ediyoruz.

Eserin hazırlanmasına katkıda bulunan tüm bölüm yazarlarına ve yayımlanma sürecinde emeği geçenlere teşekkür eder, kitabın bilim dünyasına ve tarım sektörüne yararlı olmasını dileriz.

Prof. Dr. Hasan ÖZ

ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

CLIMATE-SMART IRRIGATION: INTEGRATING DEFICIT IRRIGATION AND DIGITAL TECHNOLOGIES 1

ROHAT GÜLTEKİN, ŞUAYİP YÜZBAŞI

KÜMESLERDE MAKSİMUM HAVALANDIRMA GEREKSİNİMİNİN BELİRLENMESİ 23

ALİ ÇAYLI

ARAZİ TOPLULAŞTIRMASI VE SULAMA ALTYAPISININ BÜTÜNLEŞİK PLANLANMASI: İLKELER, KAZANIMLAR VE UYGULAMA SORUNLARI .. 44

UMUT MUCAN

BÖLÜM 1

CLIMATE-SMART IRRIGATION: INTEGRATING DEFICIT IRRIGATION AND DIGITAL TECHNOLOGIES

ROHAT GÜLTEKİN [1] ŞUAYİP YÜZBAŞI[2]

Introduction

Agricultural water management is undergoing a significant transformation driven by increasing water scarcity, climate variability, and the need for sustainable food production. These challenges are particularly severe in arid and semi-arid regions, where limited water resources directly constrain agricultural productivity. Climate change further complicates irrigation management by altering precipitation patterns, increasing evapotranspiration demand, and intensifying drought frequency, making traditional irrigation scheduling approaches increasingly inadequate.

[1] Dr., Agricultural Irrigation and Land Reclamation Department, Soil Fertilizer and Water Resources Central Research Institute, Ankara, Türkiye. rohat.gultekin@tarimorman.gov.tr, ORCID: 0000-0001-9834-4765
[2] Dr., Agricultural Irrigation and Land Reclamation Department, International Agricultural Research and Training Centre, Izmir, Türkiye, suayip.yuzbasi@tarimorman.gov.tr, ORCID: 0000-0002-3706-4740.

In response, deficit irrigation has emerged as an effective strategy for improving water productivity by applying less water than full crop requirements while maintaining acceptable yield levels (Suna et al., 2023). However, its successful implementation requires precise monitoring of soil and crop water status to avoid excessive stress and yield reductions.

Recent advances in digital technologies, including soil moisture sensors, remote sensing, and Internet of Things (IoT)-based systems, have enabled real-time data collection and more informed irrigation decisions. By integrating deficit irrigation strategies with digital technologies, climate-smart irrigation systems can improve water-use efficiency, enhance resilience to climatic uncertainty, and support sustainable agricultural production (Aghaabbasi & Ganjouei, 2026).

This chapter presents a data-driven framework for climate-smart irrigation, focusing on the integration of deficit irrigation and digital technologies. It discusses key irrigation strategies, emerging digital tools, environmental implications, and future perspectives for sustainable irrigation management.

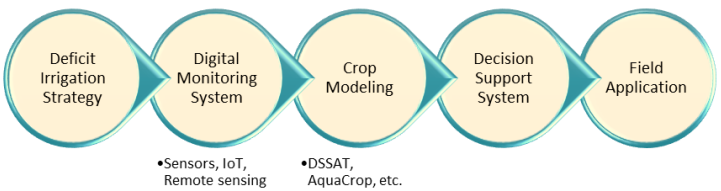
Conceptual Framework of Climate-Smart Irrigation

Climate-smart irrigation (CSI) can be conceptualized as a data-driven and adaptive water management framework designed to simultaneously enhance productivity, improve resilience to climate variability, and reduce environmental impacts. Unlike conventional irrigation approaches, which often rely on static scheduling, CSI is based on continuous feedback between field conditions and management decisions (Bwambale et al., 2024). At the core of this framework lies the integration of two fundamental components: deficit irrigation strategies and digital technologies. These components operate in a complementary manner, forming a closed-

loop system that enables dynamic and informed irrigation management.

Deficit irrigation defines the strategic dimension of the system by optimizing water allocation under limited availability. It focuses on maximizing water productivity by carefully managing the timing and magnitude of water stress. However, the success of deficit irrigation depends heavily on accurate and timely information about soil moisture status, crop water requirements, and environmental conditions (Suna et al., 2023). Digital technologies provide the operational backbone of the system by enabling real-time monitoring and data acquisition. Sensors, remote sensing tools, and IoT platforms generate high-resolution data on soil–plant–atmosphere interactions. These data streams support the continuous assessment of system performance and enable rapid adjustments in irrigation scheduling. A typical climate-smart irrigation framework is shown in Figure 1.

Figure 1. Climate-Smart Irrigation Framework



The integration of these components results in a data-driven decision-making framework, where irrigation strategies are continuously updated based on field observations. This framework can be described as a feedback-driven system consisting of three key processes: (i) data acquisition, (ii) data interpretation, and (iii) management. Data collected from the field are processed and translated into irrigation decisions, which are then implemented and monitored, creating an iterative cycle of adaptation. Such an approach allows irrigation management to transition from reactive

to proactive decision-making. It enhances the ability to cope with climatic uncertainties, improves water use efficiency, and reduces the risks associated with over- or under-irrigation. Furthermore, by optimizing resource use, climate-smart irrigation contributes to broader sustainability goals, including reduced energy consumption and lower greenhouse gas emissions.

Deficit Irrigation Strategies in the Face of Climate Change

Increasing water scarcity and the growing uncertainty associated with climate change have intensified the need for irrigation strategies that maximize water productivity while maintaining acceptable crop yields. In this context, deficit irrigation has emerged as one of the most promising approaches for sustainable agricultural water management, particularly in arid and semi-arid regions where irrigation water is limited. Unlike conventional irrigation practices that aim to fully satisfy crop evapotranspiration requirements, deficit irrigation intentionally applies water below full crop water demand during specific growth stages or throughout the growing season. The primary objective is not to maximize yield per unit area, but rather to optimize yield per unit of water used.

The importance of deficit irrigation has increased substantially under climate change scenarios characterized by irregular precipitation patterns, prolonged drought periods, and increasing evaporative demand. As freshwater resources become increasingly constrained, irrigation management must shift from maximizing water application toward maximizing irrigation efficiency and water productivity. This transition requires a more strategic and knowledge-based approach to irrigation scheduling, particularly in systems where water availability is highly variable.

Deficit irrigation strategies are based on the principle that crop sensitivity to water stress varies depending on developmental stage, environmental conditions, and crop type (Rai et al., 2022).

Therefore, carefully controlled water deficits imposed during less sensitive growth stages may reduce total water use without causing substantial yield losses. However, the success of such strategies depends on precise timing, accurate monitoring of soil water conditions, and a detailed understanding of plant physiological responses to drought stress (Ghadirnezhad et al., 2023). According to the results obtained from deficit irrigation studies conducted in certain countries within the Mediterranean climate zone, the recommended water deficit ratios are presented in Table 1.

Table 1. Recommended water reduction rates according to research results.

Country	**Irrigation Method**	**Plant**	**Recommended water reduction rate (%).**	**Literature**
Türkiye	Drip irrigation, subsurface drip irrigation, and furrow irrigation	Soybeans (second crop)	25%	Yüzbaşı et al., 2024
Tunisia	Drip irrigation	Wheat	25% of ETc	Belkher et al., 2025
Spain	Drip irrigation	Garlic	30% of ETc	Léllis et al.,2022
Spain	Drip irrigation	Grapefruit	50% of ETc	Pérez - Pérez et al., 2014
Spain	Drip irrigation	Almond	25% of ETc	Gutiérrez-Gordillo et al., 2020
Tunisia	Drip irrigation	Peach	50% of ETc	Toumi et al., 2022
Egypt	Drip irrigation	Maize	20% of ETc	El-Salhy et al., 2026
Türkiye	Intermittent subsurface drip irrigation	Black Cumin	20% of Field capacity	Gültekin et al., 2025

Italy	Drip irrigation	Olive	60% reduction compared to full irrigation.	Farolfi et al., 2024
Türkiye	Drip irrigation	Fig	25%	Akçay and Doğan, 2023
Greece	Drip irrigation	Mint	30%	Chaski et al., 2023

Several deficit irrigation approaches have been developed to improve water productivity under limited supply conditions. Regulated deficit irrigation (RDI) reduces water application during phenological stages of relatively higher stress tolerance, while partial root-zone drying (PRD) alternates irrigation between root zone sections to stimulate stomatal regulation without severely compromising photosynthesis or yield. Subsurface drip irrigation (SDI) has become increasingly central to deficit irrigation implementation by delivering water directly to the root zone, minimizing surface evaporation losses, and enabling more precise control of soil moisture dynamics (Tian et al., 2026). Pulse irrigation — characterized by shorter, more frequent application events rather than single continuous deliveries — has recently attracted considerable attention as a complementary strategy. By improving lateral water movement, reducing deep percolation, and enhancing root-zone moisture uniformity, pulse irrigation maximizes the effectiveness of each irrigation event, with its benefits varying according to soil hydraulic properties: in coarse-textured soils it limits gravitational losses during redistribution periods, while in finer-textured soils it prevents excessive water accumulation around emitters (Alazba et al., 2025; Gültekin et al., 2025b).

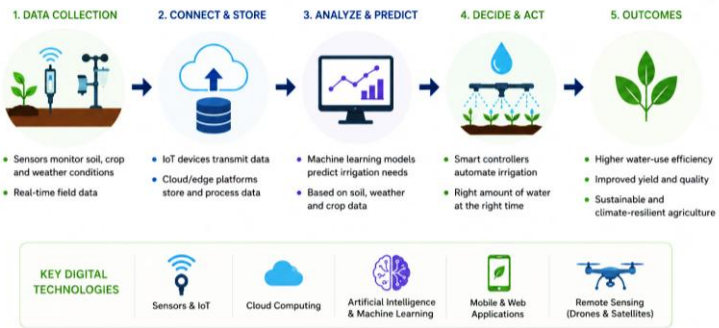
Climate change substantially complicates deficit irrigation management by intensifying plant water demand through elevated temperatures and increased atmospheric vapor pressure deficits, which accelerate soil moisture depletion and amplify physiological stress responses including reductions in stomatal conductance,

photosynthetic activity, and biomass accumulation. Water use efficiency (WUE) remains the primary performance indicator for deficit irrigation systems and frequently improves under controlled stress conditions, as water savings proportionally exceed yield reductions; however, maximum WUE does not necessarily align with maximum economic yield, necessitating optimization frameworks that integrate both agronomic and economic criteria. Meeting this requirement under dynamic climatic conditions demands continuous real-time monitoring of soil moisture, canopy temperature, and crop stress indicators — capabilities that traditional calendar-based or empirical scheduling approaches cannot provide. The integration of soil moisture sensors, remote sensing platforms, and AI-driven decision-support systems therefore transforms deficit irrigation from a static water reduction strategy into an adaptive, data-driven component of climate-smart agriculture, capable of continuously recalibrating water applications in response to evolving field conditions and delivering simultaneous gains in water productivity, climate resilience, and environmental sustainability.

Digital Technologies in Irrigation Management

Agriculture accounts for approximately 70% of global freshwater consumption, and water scarcity is becoming an increasingly severe issue due to population growth and climate change (Naresh et al., 2026). In this context, digital technologies such as remote sensing, artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data, and machine learning possess transformative potential for improving irrigation efficiency, preventing water waste, and supporting agricultural sustainability.

Figure 2. Using data and smart technologies to deliver the right amount of irrigation water



Remote sensing and uav-based monitoring

Remote sensing remains the digital technology with the broadest application base in agricultural water management. Real-time data on soil moisture, crop water stress, and irrigation requirements can be obtained through satellite imagery and multispectral/thermal sensors integrated into unmanned aerial vehicles (UAVs). UAV-based systems have been successfully applied for mapping soil moisture at different depths in kiwi orchards (Zhu et al., 2023). The Crop Water Stress Index (CWSI), calculated through thermal imaging, can be refined using machine learning-based calibration methods, enabling precise identification of water-deficient zones within fields (Kapari et al., 2024). The integration of these technologies directly supports the optimization of irrigation scheduling, prevention of over-irrigation, and efficient allocation of water resources.

Artificial intelligence and machine learning

Artificial intelligence has emerged as the fastest-growing technological field in agricultural water management, particularly after 2019, with a rapid increase in related publications. Algorithms such as Random Forest, XGBoost, and deep neural networks are

widely utilized with high accuracy in critical applications including groundwater level prediction, irrigation scheduling optimization, evapotranspiration modeling, and water quality forecasting (Abioye et al., 2022). Reinforcement learning has attracted particular attention as an emerging trend due to its ability to autonomously learn irrigation policies that dynamically adapt to changing environmental conditions; Q-learning-based models have demonstrated irrigation water savings of up to 40%. TinyML (Tiny Machine Learning) enables real-time irrigation decisions on resource-constrained edge devices, significantly reducing dependence on communication infrastructure in rural areas. Furthermore, Automated Machine Learning (AutoML) frameworks facilitate the automatic selection of the most suitable region-specific models and hyperparameter optimization with minimal human intervention.

Iot, smart sensors, and decision support systems

IoT technology enables remote monitoring and automated control of irrigation processes by transmitting real-time data related to soil moisture, temperature, humidity, and rainfall to cloud-based platforms. IoT-enabled smart sensors integrated with the Digital Twin concept can accurately predict future soil moisture conditions and dynamically update irrigation schedules based on these predictions. Decision support systems such as The Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), FieldNET Advisor and Trimble Irrigate-IQ automatically generate variable-rate irrigation plans by integrating weather forecasts, crop growth stage data, and soil moisture maps (Solovyev et al., 2019). Crop yields and water savings obtained from various studies based on digital farming applications are presented in Table 2.

Table 2. Water saving and yield performance of digital irrigation technologies

Technology Used	Water Saving Achieved Compared to Conventional Method	Yield Increase Compared to Conventional Method	Literature
Sensor-assisted precision irrigation + FAO-based scheduling	44%	Yield maintained	Gavilán et al. 2021
Scientific irrigation planning + Decision Support System (DSS)	25.5%	29%	Amami et al. 2026
IoT-based precision irrigation + Subsurface Drip Irrigation (SSDI)	20% less irrigation water compared to full conventional irrigation (100% CWR)	17%	El-Sheshny et al., 2025
Bluleaf® Smartphone DSS, Soil-Water Balance, CWSI Validation	25.7%	Targeted water use efficiency improvement; no net yield increase	Abi Saab et al., 2019
AquaCrop-OS Soil Moisture Sensors Flexible Irrigation Scheduling	Real-time scheduling: • 10% saving in dry year • Up to 60% saving in wet year with additional optimization	5.5% yield increase	Masseroni et al., 2024
AI-assisted data processing (SMARTER) PI Control Algorithm	40%	Fruit quality and yield maintained	Baiardi et al., 2026
Sentinel-2 + Soil Moisture Sensors + Variable-Rate Irrigation (VRI)	20%	No yield loss	Mayer et al. 2026

Note: CWR = Crop Water Requirement; CWSI = Crop Water Stress Index; SSDI = Subsurface Drip Irrigation; VRI = Variable-Rate Irrigation; DSS = Decision Support System.

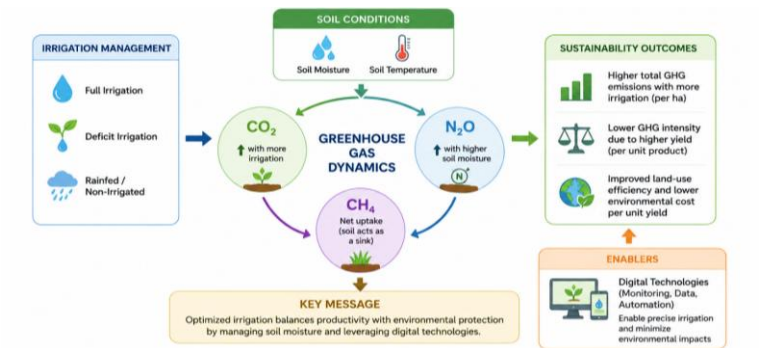
Environmental Implications and Sustainability

The sustainability of irrigated agriculture extends beyond crop productivity and water-use efficiency to encompass greenhouse gas (GHG) dynamics, soil biogeochemical processes, and long-term ecosystem functioning. Irrigation practices exert a strong regulatory influence on CO_2, N_2O, and CH_4 fluxes by modifying soil moisture, aeration, and microbial activity. Elevated soil moisture under intensive irrigation stimulates microbial respiration and CO_2 efflux, while simultaneously creating anaerobic microsites favorable for denitrification — the primary pathway of N_2O production, a gas with a global warming potential approximately 298 times that of CO_2 over a 100-year horizon (IPCC, 2014). Gültekin et al. (2023) confirmed these dynamics under drip-irrigated silage maize, reporting positive irrigation amount–soil moisture–GHG emission relationships across two consecutive growing seasons. Methane responses, however, follow an inverse pattern in well-drained upland soils: rather than acting as a source, such soils typically function as net CH_4 sinks, and Gültekin et al. (2023) demonstrated that methanotrophic activity was enhanced under full irrigation, with cumulative methane uptake exceeding non-irrigated treatments by more than 200% — evidence that moderate soil moisture increases under drip irrigation can sustain aerobic oxidation conditions without triggering net methane production.

A critical methodological consideration emerging from recent literature is the inadequacy of area-scaled GHG assessments for evaluating irrigation sustainability. Greenhouse gas intensity (GHGI) — emissions per unit of crop yield — provides a more ecologically and agronomically meaningful performance metric, as higher absolute emissions under irrigated conditions are typically offset by substantially greater biomass productivity. Gültekin et al. (2023) reported that despite reaching approximately 1,808 kg CO_2-eq ha^{-1} under full irrigation, GHGI values were considerably lower

than those recorded under rainfed management, where diminished productivity generated disproportionately high yield-scaled emissions — findings consistent with Forte et al. (2017). This yield-scaled framing is increasingly recognized as indispensable within climate-smart agriculture assessment frameworks. A complementary sustainability dimension concerns the water–energy–food nexus: while precision and digital irrigation technologies — including IoT sensor networks, automated control systems, and AI-driven monitoring platforms — inevitably increase operational energy demand, they simultaneously reduce unnecessary water applications and improve resource allocation efficiency, ultimately offering pathways to optimize emission efficiency, water productivity, and economic sustainability within a unified, nexus-aware management framework.

Figure 3. Environmental implications and sustainability in climate-smart irrigation



Digital technologies are particularly valuable for mitigating the environmental risks associated with irrigation-induced greenhouse gas emissions. Real-time soil moisture monitoring systems, remote sensing tools, and automated irrigation scheduling platforms enable irrigation decisions to be adjusted according to actual field conditions. By preventing excessive soil wetting and

maintaining optimal root-zone moisture levels, these technologies can minimize conditions favorable for excessive denitrification and unnecessary soil respiration. In this regard, the integration of deficit irrigation strategies with digital technologies represents a key pathway toward environmentally sustainable irrigation systems. Therefore, future irrigation systems should prioritize data-driven and environmentally conscious management approaches capable of balancing productivity goals with long-term ecological resilience.

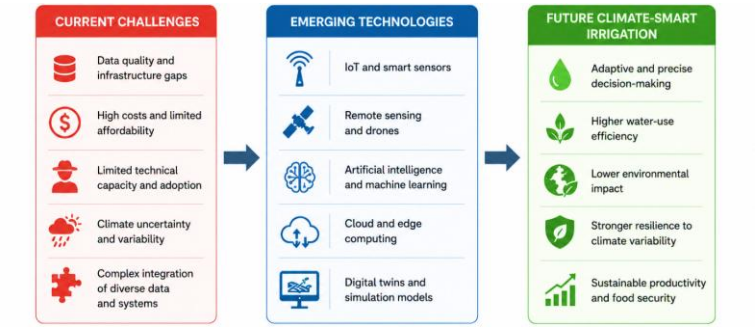
Challenges and Future Perspectives

The transition toward climate-smart irrigation has accelerated in response to increasing water scarcity, climate variability, and the need for sustainable food production. Advances in deficit irrigation, sensor technologies, remote sensing, artificial intelligence, and Internet of Things (IoT)-based monitoring systems have created significant opportunities to improve irrigation efficiency and resource management. However, the widespread adoption of data-driven irrigation systems remains limited by several technical, economic, and institutional challenges.

A major challenge is the availability and quality of data. Digital irrigation systems depend on accurate and continuous information from sensors, weather stations, remote sensing platforms, and field observations. Data gaps, sensor malfunctions, communication failures, and calibration issues can reduce the reliability of irrigation recommendations. Moreover, insufficient monitoring infrastructure in many agricultural regions, particularly in developing countries, restricts the effectiveness of these technologies. Another critical challenge is the integration of heterogeneous data sources into a unified decision-support framework. Climate-smart irrigation requires the combined use of soil, crop, weather, and management data. Despite advances in data acquisition technologies, issues related to interoperability,

incompatible software platforms, and the lack of standardized communication protocols continue to hinder the development of fully integrated and adaptive irrigation management systems.

Figure 4. Challenges, emerging technologies and future perspectives in climate-smart irrigation



The adoption of digital irrigation technologies remains constrained by economic, social, and agronomic barriers. High investment costs associated with sensors, communication infrastructure, and cloud-based platforms limit accessibility, particularly for smallholder farmers. In addition, concerns regarding system complexity, reliability, and return on investment, coupled with limited technical training and extension support, continue to slow technology adoption. User-friendly decision-support tools and farmer-centered implementation strategies are therefore essential. Agronomically, the effectiveness of deficit irrigation remains highly site-specific, varying with soil properties, crop characteristics, growth stage sensitivity, and local climatic conditions. Consequently, adaptive irrigation systems capable of continuously adjusting recommendations to local conditions are required, particularly under increasing climate variability and uncertainty.

Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) offer considerable potential to address these limitations by improving predictions of soil moisture, evapotranspiration, and crop water

stress. However, many existing models remain dependent on localized datasets, limiting their applicability across diverse agroecological conditions. Emerging approaches such as explainable artificial intelligence (XAI), federated learning, and digital twins may enhance model transparency, scalability, and decision-making capabilities while addressing concerns related to data privacy and system reliability.

Looking forward, climate-smart irrigation is expected to evolve through the integration of deficit irrigation, remote sensing, artificial intelligence, and digital decision-support systems. Advances in satellite imagery, UAV technologies, and edge computing will facilitate near real-time irrigation management at both field and landscape scales. Future irrigation frameworks will likely extend beyond water-use optimization to incorporate greenhouse gas mitigation, energy efficiency, and water–energy–food–environment nexus objectives. Achieving this vision will require continued collaboration among researchers, technology developers, policymakers, and extension services to develop affordable, scalable, and practical solutions for sustainable agricultural water management.

Conclusion

Climate change, increasing water scarcity, and growing food demands necessitate a fundamental transformation in irrigation management. Deficit irrigation offers a practical approach for improving water productivity under limited water availability, while digital technologies—including sensors, remote sensing, IoT platforms, and artificial intelligence—provide the real-time information required for adaptive and precise irrigation management. The integration of these components enables irrigation decisions to be based on actual field conditions rather than fixed

schedules, thereby improving both agronomic and environmental performance.

By combining continuous monitoring, predictive analytics, and site-specific decision-making, climate-smart irrigation systems can simultaneously improve water-use efficiency, strengthen resilience to climate variability, and reduce environmental impacts such as greenhouse gas emissions. However, realizing this potential will require supportive policies, investment in digital infrastructure, capacity-building programs for farmers, and stronger collaboration among researchers, technology developers, and policymakers. Future agricultural water policies should encourage the adoption of precision irrigation technologies through financial incentives, extension services, and technology transfer initiatives, particularly in water-scarce regions.

Ultimately, the future of irrigation lies in the integration of agronomic knowledge with digital innovation. As data-driven technologies continue to evolve, climate-smart irrigation will play an increasingly important role in ensuring sustainable food production, environmental stewardship, and long-term water security under changing climatic conditions.

References

Abioye, E. A., Hensel, O., Esau, T. J., Elijah, O., Abidin, M. S. Z., Ayobami, A. S., Yerima, O., & Nasirahmadi, A. (2022). Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions. AgriEngineering, 4(1), 70-103. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010006

Abi Saab, M. T., Jomaa, I., Skaf, S., Fahed, S., & Todorovic, M. (2019). Assessment of a Smartphone Application for Real-Time Irrigation Scheduling in Mediterranean Environments. Water, 11(2), 252. https://doi.org/10.3390/w11020252

Aghaabbasi, M., Ganjouei, F.A. Prospects of Digital Twin Systems for Smart Irrigation: A Comprehensive Review. Water Conserv Sci Eng 11, 27 (2026). https://doi.org/10.1007/s41101-026-00492-2

Akçay, S. and Doğan, P. (2023) 'Response of young fig (Ficus carica cv. Sarılop) trees to different irrigation levels in a semi-arid mediterranean environment ', Journal of Elementology, 28(3). https://doi.org/10.5601/jelem.2023.28.3.3058

Alazba, A. A., Elnesr, M. N., Shaban, M., Alrdyan, N., Radwan, F., & Ezzeldin, M. (2025). Field Assessment of Subsurface Intermittent Water Flow via Porous and Emitting Pipes. Water, 17(21), 3143. https://doi.org/10.3390/w17213143

Amami, H. E., Domínguez, A., Muanda, C., Martínez-Romero, Á., Martínez-López, J. A., Dalezios, N. R., Dercas, N., Faraslis, I., Spiliotopoulos, M., Kompany, J. R., Sâada, M. B., & Nsiri, R. (2026). The Impact of Scientific Irrigation Scheduling on Water Use Efficiency, Energy Productivity and Economic Profitability: Analysis at the Farm Level in Tunisia. Water, 18(6), 655. https://doi.org/10.3390/w18060655

Belkher, S., Latrech, B., Bekri, W., Markwordt, F., Rahim, M. A., Dupont, C., Ben Abdallah, M. A., Daghari, H., & Rezig, M. (2025). Deficit Irrigation and an IoT-Based System for Improving Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat Grown Under Semi-Arid Conditions. Agronomy, 15(1), 157. https://doi.org/10.3390/agronomy15010157

Baiardi, A., Francia, M., Golfarelli, M., Papadopoulos, A. V., & Pasini, M. (2026). Prescriptive watering: Data-driven optimization of water consumption in kiwifruit orchards. Computers and Electronics in Agriculture, 243, 111306. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111306

Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2024). Towards a modelling, optimization and predictive control framework for smart irrigation. Heliyon, 10(18). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38095

Chaski, C., Giannoulis, K. D., Alexopoulos, A. A., & Petropoulos, S. A. (2023). Biostimulant Application Alleviates the Negative Effects of Deficit Irrigation and Improves Growth Performance, Essential Oil Yield and Water-Use Efficiency of Mint Crop. Agronomy, 13(8), 2182. https://doi.org/10.3390/agronomy13082182

El-Salhy, AF.M., Salem, EN.H., Mohamed, M.M.A. et al. Deficit-irrigation management for sustainable grape production (Vitis vinifera L.): different regimes to assess yield and berry quality under arid conditions. Sci Rep 16, 12724 (2026). https://doi.org/10.1038/s41598-026-47407-8

El-Sheshny, A.A., Abdel-Hameed, A.M., Al-Rajhi, M.A. et al. Optimizing water management in greenhouse farming through an IoT-enabled monitoring system. J. Saudi Soc. Agric. Sci. 24, 33 (2025). https://doi.org/10.1007/s44447-025-00039-2

Farolfi, C., Tombesi, S., Lucini, L., Capri, E., & García-Pérez, P. (2024). Influence of Fruit Load and Water Deficit on Olive Fruit Phenolic Profiling and Yield. International Journal of Plant Biology, 15(3), 895-913. https://doi.org/10.3390/ijpb15030064

Forte, A., Fiorentino, N., Fagnano, M., Fierro, A., & Mori, M. (2017). Mitigation impact of minimum tillage on CO_2 and N_2O emissions in Mediterranean maize cropping systems under different water regimes. Soil and Tillage Research, 170, 53–61. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.014

Gavilán, P., Ruiz, N., Miranda, L., Martínez-Ferri, E., Contreras, J. I., Baeza, R., & Lozano, D. (2021). Improvement of Strawberry Irrigation Sustainability in Southern Spain Using FAO Methodology. Water, 13(6), 833. https://doi.org/10.3390/w13060833

Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., Taghavi Ghasemkheili, F., Amiri, E., & Pessarakli, M. (2023). Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—A review. Journal of plant Nutrition, 46(9), 2198-2230. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720

Gutiérrez-Gordillo, S., Lipan, L., Durán Zuazo, V. H., Sendra, E., Hernández, F., Hernández-Zazueta, M. S., Carbonell-Barrachina, Á. A., & García-Tejero, I. F. (2020). Deficit Irrigation as a Suitable Strategy to Enhance the Nutritional Composition of HydroSOS Almonds. Water, 12(12), 3336. https://doi.org/10.3390/w12123336

Gültekin, R., Ertek, A., Görgişen, C., Yeter, T., Avağ, K., & Yıldırım, Y. E. (2025). Impact of intermittent and deficit irrigation practices in subsurface drip systems on yield and morphological traits of black cumin (Nigella sativa L.). Paddy and Water Environment, 23(3), 373-388. https://doi.org/10.1007/s10333-025-01021-y

Gültekin, R., Ertek, A., Görgişen, C., Yeter, T., Avağ, K., & Yıldırım, Y. E. (2025b). Effect of deficit and intermittent subsurface drip

irrigation on soil water distribution. Journal of Soil and Water Conservation, 80(2), 144–156. https://doi.org/10.1080/00224561.2024.2448100

Gultekin, R., Kadri, A. V. A. Ğ., Görgişen, C., Öztürk, Ö., Yeter, T., & Alsan, P. B. (2023). Effect of deficit irrigation practices on greenhouse gas emissions in drip irrigation. Scientia Horticulturae, 310, 111757. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111757

IPCC (2014) Climate Change 2014. Fifth Assessment Synthesis Report (Longer report) of intergovernmental panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Kapari, M., Sibanda, M., Magidi, J., Mabhaudhi, T., Nhamo, L., & Mpandeli, S. (2024). Comparing machine learning algorithms for estimating the maize crop water stress index (CWSI) using UAV-acquired remotely sensed data in smallholder croplands. Drones, 8(2), 61. https://doi.org/10.3390/drones8020061

Léllis, B. C., Martínez-Romero, A., Schwartz, R. C., Pardo, J. J., Tarjuelo, J. M., & Domínguez, A. (2022). Effect of the optimized regulated deficit irrigation methodology on water use in garlic. Agricultural Water Management, 260, 107280. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107280

Masseroni, D., Gangi, F., Ghilardelli, F. et al. Assessing the water conservation potential of optimized surface irrigation management in Northern Italy. Irrig Sci 42, 75–97 (2024). https://doi.org/10.1007/s00271-023-00876-5

Mayer, A., Ortuani, B., Crema, A., Boschetti, M., & Facchi, A. (2026). Water and energy savings using variable rate sprinkler irrigation on a large maize farm in northern Italy. Agricultural Water Management, 325, 110184. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110184

Naresh, R. K., Gupta, R. K., Garg, R., Sohane, R. K., Singh, J. P., Gupta, O. P., ... & Kumar, V. (2026). Artificial Intelligence in Crop Water Management: A Path to Conservation and Productivity. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781042010295

Pérez-Pérez, J. G., Robles, J. M., & Botía, P. (2014). Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby'grapefruit trees in semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 133, 44-54. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.002

Rai, A., Sarkar, S., Jha, P.K. (2022). Deficit Irrigation: An Optimization Strategy for a Sustainable Agriculture. In: Dubey, S.K., Jha, P.K., Gupta, P.K., Nanda, A., Gupta, V. (eds) Soil-Water, Agriculture, and Climate Change. Water Science and Technology Library, vol 113. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12059-6_9

Solovyev, D. A., Kamyshova, G. N., Terekhova, N. N., Goryunov, D. G., & Vardumyan, A. (2019). Digital technologies in irrigation management. Agrarian Scientific Journal, 4, 93–97. https://doi.org/10.28983/asj.y2019i4pp93-97

Suna, T., Kumari, A., Paramaguru, P.K., Kushwaha, N.L. (2023). Enhancing Agricultural Water Productivity Using Deficit Irrigation Practices in Water-Scarce Regions. In: Naorem, A., Machiwal, D. (eds) Enhancing Resilience of Dryland Agriculture Under Changing Climate. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9159-2_11

Tian, W., Yu, S., Guo, F., Zhang, Z., Liu, Y., Wang, Y., Zhang, J., & Shi, S. (2026). Advances in Subsurface Drip Irrigation System Design, Water–Fertilizer Synergy, and Sustainable Wheat Production in Xinjiang. Water, 18(7), 852. https://doi.org/10.3390/w18070852.

Toumi, I., Zarrouk, O., Ghrab, M., & Nagaz, K. (2022). Improving Peach Fruit Quality Traits Using Deficit Irrigation Strategies in Southern Tunisia Arid Area. Plants, 11(13), 1656. https://doi.org/10.3390/plants11131656

Yüzbaşı, Ş., Karagül, V., Aras, S., & Akkuzu, E. (2024). The effect of sustained deficit irrigation and different irrigation methods on yield and evapotranspiration of second-crop soybeans in the Mediterranean Basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 150(5), 04024018. https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10293

Zhu, S., Cui, N., Zhou, J., Xue, J., Wang, Z., Wu, Z., ... & Deng, Q. (2023). Digital mapping of root-zone soil moisture using UAV-based multispectral data in a kiwifruit orchard of northwest China. Remote Sensing, 15(3), 646. https://doi.org/10.3390/rs15030646

BÖLÜM 2

KÜMESLERDE MAKSİMUM HAVALANDIRMA GEREKSİNİMİNİN BELİRLENMESİ

ALİ ÇAYLI[1]

Giriş

Modern etlik piliç kümeslerinde hayvan refahını, sağlık durumunu ve verimliliğini sürdürülebilir bir şekilde sağlamak için uygun çevresel koşulların oluşturulması gereklidir. Özellikle sıcaklık, nem, hava hareketleri ve atmosferik gazların yoğunluğu gibi çevre faktörleri, doğrudan hayvan sağlığını ve üretim performansını etkileyen kritik parametrelerdir. Bu nedenle, barınaklarda uygun ısı ve nem dengesinin sağlanması, yalnızca hayvan refahını korumakla kalmaz, aynı zamanda üretim kayıplarının önüne geçilmesinde de belirleyici rol oynar (Caenegem ve Wechsler, 2000; Mutaf, 2012; Çaylı ve ark., 2021).

Kümeslerde kullanılan havalandırma sistemlerinin temel amacı, hayvanların sağlıklı bir şekilde büyümesini desteklemek ve yüksek verimli bir üretim için uygun çevre koşullarını sağlamaktır. Yaz aylarında, hayvanların ısı stresinden korunabilmesi için maksimum havalandırmaya ihtiyaç duyulurken; kış aylarında ise

[1] Doç. Dr., Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-8332-2264, alicayli@ksu.edu.tr

yapı içi hava kalitesini korumak ve yoğuşma riskini azaltmak amacıyla minimum havalandırma oranlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Schauberger ve ark., 2000). Özellikle soğuk mevsimlerde yetersiz havalandırma, iç ortam neminin artmasına neden olmakta; bu durum hem patojenlerin yayılmasını kolaylaştırmakta hem de yapı elemanlarında fiziksel hasarlara yol açabilmektedir. Tamamen kapalı kümeslerde hava hareketinin etkin bir şekilde sağlanması, özellikle sıcak havalarda, tavukların sağlığı ve performansı üzerinde doğrudan etki göstermektedir (Hellickson ve Walker, 1983; Lindley ve Whitaker, 1996; Büyüktaş ve ark., 2016). Bu tür olumsuzluklar, doğrudan üretim kayıplarına; dolaylı olarak ise tedavi amacıyla kullanılan ilaç miktarının artmasına neden olmaktadır (Reece ve Lott, 1982; Cave ve ark., 1985; Zhou ve ark., 2017). Havalandırma sistemlerinin etkinliği ise; barınak içerisindeki hava sıcaklığı, bağıl nem oranı ve hava hızının hayvan seviyesinde kontrol edilebilmesi ile zararlı gazlar, toz partikülleri ve biyoaerosol yoğunluklarının tolere edilebilir sınırlar içinde tutulabilme kapasitesine bağlı olarak değerlendirilmektedir (Seedorf ve ark., 1998).

Pek çok araştırmacının da vurguladığı üzere, özellikle kümes hayvanları; sıcaklık, ışık ve hava değişim oranlarına karşı oldukça hassas tepkiler vermektedir. Optimal çevre koşullarının sağlanamaması ise hem biyolojik hem de ekonomik açıdan son derece olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Bununla birlikte, son yıllarda gerçekleştirilen kapsamlı araştırma ve geliştirme çalışmaları, mekanik ve doğal havalandırma sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımış; böylece farklı hayvan türleri ve üretim koşullarına uygun çözümler sunulmuştur. Ancak bu sistemlerin tasarımı ve performans değerlendirmesi, hava akımlarının yönü ve şiddeti, hava giriş-çıkış açıklıklarının geometrisi, iç mekândaki sabit ekipmanların yerleşimi ve hayvanların konumuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Drury, 1966; Wilson ve ark., 1983; Bucklin ve ark., 2009;

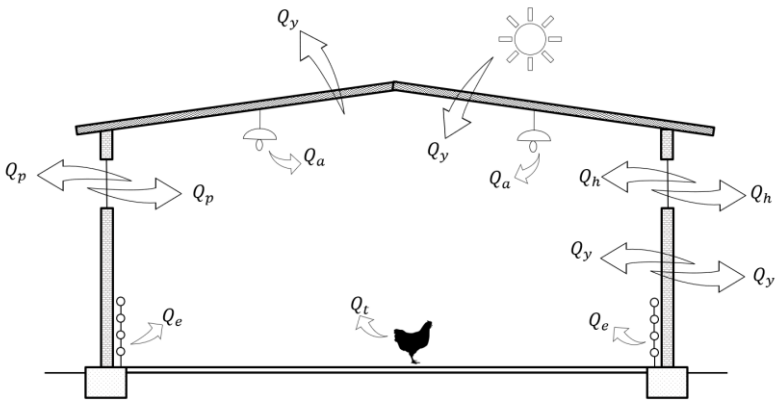
Bustamante ve ark., 2015). Bu nedenle, özellikle kümes hayvanlarının barındırıldığı yapılarda ısı ve nem dengesinin korunması için gereken havalandırma miktarının doğru bir şekilde hesaplanması hem hayvan refahı hem de üretim verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, literatürde tanımlanmış temel ilkeler ve hesaplama yöntemleri doğrultusunda, kümeslerde ısı ve nem dengesinin sağlanmasına yönelik gerekli havalandırma gereksiniminin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu çerçevede, havalandırma sistemlerinin tasarımı, hesaplama yaklaşımları ve uygulama yöntemleri sistematik biçimde ele alınacak; ayrıca, teorik bilgilerin pratik bir bakış açısıyla pekiştirilmesi amacıyla örnek bir hesaplama uygulamasına yer verilecektir. Çalışmanın temel hedefi, kümes hayvanlarının optimum çevresel koşullarda barındırılabilmesi için gerekli havalandırma miktarının, doğru ve uygulanabilir yöntemlerle belirlenmesine katkı sağlamaktır.

Kümeslerde ısı ve nem dengesi

Bir yapının her bir bileşeninden gerçekleşen ısı kaybı veya ısı kazancı; ilgili yüzey alanı, ısı transfer katsayısı ve iç-dış ortam sıcaklıkları arasındaki farkla orantılıdır. Yapının dış çevre ile olan ısı alışveriş süreçleri, Mutaf ve Sönmez (1984) temel alınarak Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1. Kümeslerde ısı değişimi



Kümeste ısı ve nem dengesinin sağlanabilmesi için aşağıdaki enerji denkleminin dengede olması gerekir:

$$Q_t + Q_a \pm Q_y \pm Q_p \pm Q_h \pm Q_e = 0$$

Burada; Q_t hayvanlardan gelen duyulur ısı kazancı (W), Q_a aydınlatmadan gelen ek ısı (W), Q_y yapı bileşenleri aracılığıyla iletim ve radyasyon ısı kaybı veya kazancı (W), Q_p pencerelerden gelen iletim ve radyasyon ısı kaybı veya kazancı (W), Q_h havalandırma ısı kaybı veya kazancı (W), Q_e mekanik ek ısıtma veya soğutma (W) değerini ifade etmektedir. Bu denklemin Q_e değeri sıfırdan küçükse, kümes soğutulur, sıfırdan büyükse kümes ısıtılır.

Yapı elemanlarından oluşan kondüksiyon yolu ile ısı aktarımları

Duvar, çatı, pencere ve zeminden oluşan kayıpların toplamı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$Q_y = (Q_duvar + Q_çatı + Q_pencere + Q_zemin)(1 + M_o)$$

Bir duvar veya çatıdan kaynaklanan ısı kayıpları ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$Q_{\text{Duvar veya Çatı}} = U \times A \times \Delta t$$

Burada: U toplam ısı iletim katsayısı (W m^{-2} K^{-1}), A dikkate alınan çatı veya duvarın yüzey alanı (m^2), Δt duvar veya çatı ile ayrılan alanlar arasındaki sıcaklık farkı (K), M_o rüzgârlı bölgeler için düzeltme katsayısı (kümes rüzgârlı bir konumda bulunuyorsa, toplam iletim ısı kayıplarına %5 eklenir). Kış koşullarında ısı dengesinin hesaplanmasında zeminden iletim ısı kayıpları için aşağıdaki eşitlik kullanılır (CIGR, 1984).

$$Q_{zemin} = k_{eff} \times A \times \Delta t$$

Burada; k_{eff} zemin için ısı iletim katsayısı (W m^{-2} K^{-1}), Δt iç ortam sıcaklığı (t_i) ile dış ortam sıcaklığı (t_d) arasındaki sıcaklık farkı (K), A zemin yüzey alanı (m^2).

İzin verilen maksimum zararlı gaz konsantrasyonları

Kümeslerdeki hava kalitesi, hayvan sağlığı ve verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Ortamdaki zararlı gazların konsantrasyonu belli sınırların üzerine çıktığında, hayvanlarda solunum yolu hastalıkları, stres ve büyüme geriliği gibi ciddi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, başta karbondioksit (CO_2), amonyak (NH_3), hidrojen sülfür (H_2S) ve karbonmonoksit (CO) olmak üzere zararlı gazların müsaade edilen maksimum seviyelerinin bilinmesi ve sürekli olarak kontrol altında tutulması gerekmektedir. Söz konusu bu zararlı gazlar için önerilen maksimum konsantrasyonlar Çizelge 1'de verilmiştir (CIGR, 1984).

Çizelge 1. Kümeslerde önerilen maksimum gaz konsantrasyonları

Gaz	Maksimum konsantrasyon (ppm)
Karbondioksit (CO_2)	*1500-3000
Amonyak (NH_3)	20
Hidrojen Sülfür (H_2S)	0.5
Karbonmonoksit (CO)	10
**4 haftaya kadar olan civcivlerde*	

Karbondioksit (CO_2), hayvanların metabolik faaliyetleri sonucunda üretilerek solunum yoluyla dış ortama atılır. İç mekân havasındaki CO_2 konsantrasyonu, ortamın genel hava kalitesinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilir ve mümkün olduğunca düşük seviyelerde tutulmalıdır. Minimum havalandırma gereksiniminin hesaplanmasında genellikle 3000 ppm'lik bir eşik değeri referans alınmakla birlikte, kısa süreli dalgalanmalar meydana gelebilir. Dış ortam havası ortalama olarak yaklaşık 300-400 ppm CO_2 içerirken, akciğerlerden dışarı verilen hava 40.000–60.000 ppm seviyelerinde CO_2 konsantrasyonuna sahiptir.

Amonyak (NH_3), gübreden kaynaklanan ve öncelikle gübre yönetimi ile ilişkili bir sorundur. Hidrojen sülfür (H_2S) ise gübrenin anaerobik fermantasyonu sonucu ortaya çıkar ve özellikle gübre karıştırıldığında ortama salınır. Karbonmonoksit (CO), çoğunlukla fosil yakıtla çalışan ısıtma sistemlerinden kaynaklanır. Yaklaşık 350 ppm düzeyindeki CO konsantrasyonu ölümcül olabilirken, olumsuz fizyolojik etkiler 50 ppm gibi daha düşük seviyelerde bile gözlemlenebilmektedir. CO'nun, normal kimyasal analiz teknikleriyle ortam havasında eser miktarın üzerinde tespit edilmesi durumunda, ısıtma sistemlerine ait brülörlerin ayarlanması ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir (Mutaf ve ark., 1991).

Havalandırma ile oluşan duyulur ısı aktarımı

Havalandırma, ortamın hava kalitesini iyileştirirken aynı zamanda ortam sıcaklığını da önemli ölçüde etkiler. Bu etki, "duyulur ısı aktarımı" olarak adlandırılır ve iç-dış sıcaklık farkına bağlı olarak ortamdan ısı kaybına veya ortama ısı kazanımına neden olur. Soğuk mevsimlerde havalandırma, ısıtma yükünü artıran bir ısı kaybı yaratırken; sıcak mevsimlerde dışarıdaki sıcak havanın içeriye girmesi, soğutma ihtiyacını doğurabilir. Bu ısıl etkinin hesaplanması, enerji verimliliği ve konfor koşullarının sağlanması açısından büyük

önem taşımaktadır. Havalandırma ile ısı kaybı veya kazancı aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$Q_h = \sum q_v \times C_p \times \Delta t$$

Burada; Q_h havalandırma ile oluşan ısı kaybı veya kazancı (W), q_v kütlesel hava debisi (kg s^{-1}), C_p havanın özgül ısısı (J kg^{-1} K^{-1}), Δt yapının iç ve dış ortamı arasındaki sıcaklık farkı (K).

Havalandırma miktarının belirlenmesi

Isı-nem dengesine bağlı olarak kümes ortamında bir ısı açığı mı yoksa ısı fazlası mı bulunduğunun belirlenebilmesi için, öncelikle gerekli havalandırma debisi (q_v) hesaplanmalıdır. Belirlenen bu hava debisinin neden olduğu ısı kayıpları veya kazançları doğrultusunda ek ısıtma, soğutma ya da yalıtım gibi önlemler alınabilir. Havalandırma gereksiniminin belirlenmesinde; iç ortam hava kalitesinin korunması, nem dengesinin sağlanması ve yapıdan kaynaklı sızma kayıpları dikkate alınır. Bu doğrultuda, sızma kayıplarından kaynaklanan hava debisi ($q_{vsız}$), nem dengesini korumaya yönelik hava debisi (q_{vnem}) ve karbondioksit konsantrasyonuna bağlı olarak hava kalitesini sağlamak amacıyla gerekli hava debisi (q_{vCO_2}) hesaplanır. Bu üç farklı debi değeri karşılaştırılarak, iç ortam koşullarını koruyacak şekilde en yüksek olan değer esas alınır (Caenegem ve Wechsler, 2000; Mutaf, 2012).

Sızdırmazlık sonucu oluşan hava debisi kümes hacminin üç katı olduğu varsayılır ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (CIGR, 1984).

$$q_{vSız} = V_{kümes} \times 3$$

Kümes içerisindeki bağıl nem oranının kontrol altında tutulabilmesi için, hayvanlar tarafından üretilen nemin uygun miktarda havalandırma ile dış ortama atılması gerekmektedir. Bu kapsamda, nem dengesinin sağlanması için gerekli olan havalandırma debisi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$q_{vNem} = \frac{T_h \times m_{hnem}}{(m_i - m_d)}$$

Burada; q_{vnem} kütlesel havalandırma debisi (kg h^{-1}), T_h, toplam hayvan sayısı (adet), m_{hnem}, bir hayvanın ürettiği su buharı (g h^{-1}), m_i iç ortam havasının özgül nemi (g kg^{-1} KH), m_d dış ortam havasının özgül nemidir (g kg^{-1} KH).

Tavukların yaş, ağırlık ve yetiştirme sistemine göre ısı ve nem üretimi ile minimum ve varsayılan çevresel istekleri, CIGR (1984) verilerine dayanarak Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Tavukların çevresel istekleri ve çevreye saldıkları ısı, nem ve CO_2 miktarları

		Etlik Piliç (Yerde)					**Yumurta Tavuğu (Kafeste)**	
Parametreler	Birim	0.05 kg	0.3 kg	0.5 kg	1.0 kg	1.5 kg	1.5 kg	2.0 kg
Uygulamada En Düşük Sıcaklık	°C	30	27	24	18	18	12	12
Varsayılan Sıcaklık (Yaz)	°C	30	30	30	30	30	30	30
Varsayılan Sıcaklık (Kış)	°C	30	27	24	18	18	18	18
Varsayılan Bağıl Nem (Kış)	%	60	63	66	72	72	72	72
Toplam Isı (Yaz)	W	1.1	3.9	5.7	9.6	13.0	9.1	11.3
Toplam Isı (Kış)	W	1.1	4.0	5.9	10.0	13.6	9.5	11.8
Su Buharı (Yaz)	g h^{-1}	1.0*	3.9	5.7	9.5	12.9	9.0	11.2
Su Buharı (Kış)	g h^{-1}	1.0*	3.2	3.9	4.6	6.3	4.4	5.4
Duyulur Isı (Yaz)	W	0.33*	1.3	1.9	3.1	4.3	3.0	3.7
Duyulur Isı (Kış)	W	0.33*	1.8	3.3	6.9	9.3	6.5	8.1
CO_2 Üretimi (Kış)	L h^{-1}	0.17*	0.65	0.97	1.6	2.2	1.5	1.9

**0.05 kg canlı ağırlığındaki etlik piliçler için duyulur ısı ve su buharı üretimi değerleri yaklaşık olarak verilmiştir. Bu yaş grubu için duyulur/gizli ısı oranı belirsiz olduğundan, değerlerde tahmini sapmalar olabilir.*

Bu çizelgede; uygulamada gerekli en düşük sıcaklık, yaz ve kış dönemleri için varsayılan sıcaklıklar, varsayılan bağıl nem oranı, toplam ısı üretimi, su buharı üretimi, duyulur ısı ve karbondioksit üretimi değerleri verilmiştir.

Kümeslerde, iç ortam hava kalitesinin sürdürülebilirliği açısından CO_2 konsantrasyonu önemli bir göstergedir. Hayvanlardan kaynaklanan CO_2 üretimi temel alınarak, minimum havalandırma debisi aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$q_{vCO_2} = \frac{T_h \times m_{hCO_2}}{(m_{CO_{2i}} - m_{CO_{2d}})}$$

Burada; q_{vCO_2} hava debisi (kg s^{-1}), T_h,toplam hayvan sayısı (adet), m_{hCO_2}bir hayvanın ürettiği karbondioksit miktarı (L), $m_{CO_{2i}}$ iç ortam havasının karbondioksit içeriği (kg CO_2 kg^{-1} KH), $m_{CO_{2d}}$ dış ortam havasının karbondioksit içeriğidir (kg CO_2 kg^{-1} KH).

CO_2'nin moleküler ağırlığı (1.98 kg m^{-3}) havanınkinden (1.29 kg m^{-3}) biraz daha yüksek olmasına rağmen, kümeste nispeten daha iyi dağılır. Bu durum, CO_2'nin sıcak solunum havasında çözünmesiyle ilgilidir (Caenegem ve Wechsler, 2000).

İç ortamda izin verilen maksimum CO_2 3000 ppm veya %0.3'tür. Bu durumda;

$m_{CO_{2i}} = \frac{0.3}{100} \times 1.529 = 4.587 \times 10^{-3}$ kg CO_2 kg^{-1} KH olur.

Dış ortamda CO_2 300 ppm veya %0.0.3 olarak kabul edilirse, bu durumda;

$m_{CO_{2i}} = \frac{0.03}{100} \times 1.529 = 0.459 \times 10^{-3}$ kg CO_2 kg^{-1} KH olur.

Kütlesel kuru hava debisinden hacimsel nemli hava debisine dönüşüm

Havalandırma sistemlerinin tasarımında, hesaplamalar kütlesel hava debisi (kg s^{-1}) üzerinden yapılmalıdır. Bunun temel nedeni, kütlesel debilerin sıcaklık ve basınçtan bağımsız olması, dolayısıyla daha güvenilir ve doğrudan karşılaştırılabilir sonuçlar sunmasıdır. Buna karşılık, hacimsel debiler (m^3 h^{-1}) sıcaklık, basınç ve nem oranından etkilenir ve bu nedenle hesaplamalarda daha fazla değişkenlik gösterir. Ancak, uygulamalarda sistemlerin kapasitesi, fan seçimleri ya da havalandırma açıklıklarının boyutlandırılması gibi alanlarda hacimsel debi kullanılır. Bu nedenle, hesaplama sürecinde zaman zaman kütlesel debilerden hacimsel debilere veya tersi yönde dönüşüm yapılması gerekebilir. Bu dönüşüm işlemi için, nemli hava içinde 1 m^3 hava hacmine karşılık gelen kuru hava kütlesinin bilinmesi gerekir.

Kütlesel kuru hava debisinden (kg KH s^{-1}) hacimsel nemli hava debisine (m^3 h^{-1}) dönüşüm, aşağıdaki formül ile yapılabilir (CIGR, 1984).

$$\rho = \frac{2.168\ p}{T\ (m_m + 0.622)}$$

Burada; ρ nemli hava içindeki kuru havanın yoğunluğu (kg kuru hava/m^3 nemli hava), p atmosfer basıncı (kPa), T mutlak sıcaklık (K), m_m havadaki su buharı içeriğidir (kg H_2O/kg kuru hava (KH)).

Normal atmosfer basıncında (p = 101.325 kPa) havanın yoğunluğu şu şekilde hesaplanır:

$$\rho = \frac{219.67}{T\ (m_m + 0.622)}$$

Çizelge 3'te hava yoğunluğunu ve 1 kg kuru hava başına saatlik hacimsel debiler (m^3 h^{-1}) gösterilmektedir. Bağıl nemin %70 olduğu varsayılmıştır. Diğer bağıl nem değerleri çok küçük sapmalara gösterebilir.

Çizelge 3. Farklı Sıcaklıklarda Hava Yoğunluğu ve Hacimsel Hava Debisi (Bağıl Nem %70)

Sıcaklık (°C)	Nemli Havanın m^3'ü Başına Kuru Hava (kg)	Kuru Hava kg'ı Başına Hacimsel Debi ($m^3\ h^{-1}$)
-20	1.39	2590
-15	1.36	2650
-10	1.34	2690
-5	1.31	2750
0	1.29	2790
+5	1.26	2860
+10	1.24	2905
+15	1.21	2975
+20	1.19	3025
+25	1.17	3115
+30	1.13	3185

Çizelgede, %70 bağıl nem oranı altında farklı sıcaklıklarda nemli hava hacmi başına düşen kuru hava kütlesi ve kuru hava kütlesi başına düşen hacimsel hava debisi verilmiştir. Bu değerler, havalandırma hesaplamalarında kütlesel debiler ile hacimsel debiler arasında dönüşüm yapmak için kullanılmaktadır. Farklı bağıl nem değerlerinde bu değerlerde küçük farklılıklar gözlenebilir ancak %70 bağıl nem standart uygulamalar için temsil edici bir değerdir.

Karbondioksiti hacimsel debiden, kütlesel debiye dönüştürme

Genellikle CO_2 konsantrasyonları hacim yüzdesi olarak verilir (örneğin, dış havadaki CO_2 konsantrasyonu %0.03 veya 300 ppm'dir). Ayrıca, CO_2 üretim rakamları da çoğunlukla L h^{-1} (litre/saat) cinsinden verilir. Bu dönüşüm problemi, CO_2 yoğunluğunun kuru hava yoğunluğuna oranı olan 1.529 kullanılarak çözülebilir. Bunu yukarıdaki hava yoğunluğu formülüne dahil ederek şunu yazabiliriz (CIGR, 1984):

$$\rho_k = 1.529 \frac{2.168\, p}{T(0.622)} = 5.3294\ \frac{p}{T}$$

Atmosfer basıncının 101.325 kPa olduğu kabul edilirse;

$$\rho_k = 539.9 \frac{1}{T}$$

Örneğin dış ortam havasında CO_2 300 ppm (%0.03) olduğu varsayılırsa;

$$\frac{0.03}{100} \frac{m^3\ CO_2}{m^3\ hava} \times 1.529\ \frac{kg\ CO_2/m^3\ CO_2}{kg\ hava/m^3\ hava}$$
$$= 0.459 \times 10^{-3} \frac{kg\ CO_2}{kg\ KH\ (kuru\ hava)}$$

Eğer CO_2 üretimi 20°C'de 100 L h^{-1} ise;

$$100 \frac{L\ CO_2}{h} = \frac{0.1\ m^3 CO_2}{h} = \frac{0.1}{3600} \frac{m^3 CO_2}{s}$$
$$= 0.0278 \times 10^{-3} \frac{m^3 CO_2}{s}$$

$$0.0278 \times 10^{-3} \frac{m^3 CO_2}{s} \times \frac{539.99}{(20 + 273.15)} \frac{kg\ CO_2}{m^3 CO_2}$$
$$= 5.121 \times 10^{-5} \frac{kg\ CO_2}{s}$$

1 L h^{-1} CO_2 için; $5.121 \times \frac{10^{-5}}{100} = 5.121 \times 10^{-7}$ kg CO_2 s^{-1} olarak bulunur.

Örnek Hesaplama

Hesaplamalarda esas alınan kümesin boyutları; uzunluk 39.0 m, genişlik 13.0 m ve yükseklik 2.60 m olarak belirlenmiştir. Isı iletim katsayısı; duvar ve tavan için 0.5 m^{-2} K^{-1}, zemin için ise 0.2 W m^{-2} K^{-1} olarak kabul edilmiştir. Etlik piliç kümesinde toplam 10000 adet hayvan bulunduğu ve ölüm oranının %0 olduğu varsayılmıştır. Canlı ağırlık değerleri, civciv döneminde 0.05 kg, piliç döneminde

ise 1.5 kg olarak alınmıştır. İç ve dış ortam sıcaklığı, nem ve CO_2 düzeyleri ise Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Varsayılan hesaplama parametreleri

	Civciv (0.05 kg)	**Piliç (0.5 kg)**
İç ortam sıcaklık	30	24
İç ortam nem	60	66
Dış ortam sıcaklık	-10	-10
Dış ortam nem	100	100
İç ortam CO2	3000	3000
Dış ortam CO2	300	300

Varsayılan sıcaklık ve nem değerlerine göre psikrometrik çizelgelerden elde edilen ilgili değerler için havanın özgül nemi Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Havanın bazı sıcaklık ve nem değerleri için kütlesel özgül nemi

Sıcaklık (°C)	**Nem (%)**	**Kütlesel özgül nem (g kg-1)**
30	100	27.17
20	100	14.73
-8	100	1.91
-10	100	1.60

Uygulamada, ilk haftalarda kümes alanının yalnızca 1/3'ü kullanılır. Bu nedenle, maksimum ısıtma ihtiyacı ilk gün veya hayvanların tümü kümese salındığı gün ortaya çıkabilir.

Civciv dönemi (0.05 kg) için maksimum ısıtma kapasitesinin hesaplanması

Civcivler için ısı ve nem üretimi Çizelge 2'de verilmiştir. Bu dönemde ısı ve nem üretim değerlerinin çok düşük olması, havalandırma yapılmadığı anlamına gelmez, çünkü her zaman kümeste hava sızması olur. Bu sızma, kümes hacminin saatte üç katı olarak tahmin edilebilir (CIGR, 1984).

$$q_v = V \times 3$$

Uygulamada, ilk haftalarda kümesin yalnızca 1/3'ü kullanılır. Bu nedenle civciv dönemi kümes hacmi:

$$V_{kümes} = W \times L \times h$$

$$V_{kümes(civciv)} = W \times L \times h \,/3$$

$$V_{kümes} = \frac{39 \times 13 \times 2.6}{3} = 439\ m^3$$

Sızma yoluyla oluşan kütlesel hava debisi;

$$q_{vSız} = V\ \times 3$$

$$q_{vSız} = 439\ \times 3 = 1488\ kg\ h^{-1}$$

Nem dengesi için hava debisi ise;

$$q_{v\mathrm{Nem}} = \frac{10000 \times 1.0}{0.6 \times 27.17 - 1.6} = 679\ kg\ h^{-1}$$

Civciv dönemi için, $q_{vSız} > q_{vNem}$ olduğundan dolayı havalandırma ile oluşan ısı kaybının hesaplanmasında sızma kayıpları hava debisi dikkate alınır.

Havalandırma ile oluşan ısı kaybı

$$Q_v = \sum q_v\ \times C_p\ \times \Delta t$$

$$Q_v = \frac{1488\ \mathrm{kg}}{\mathrm{h}} \times \frac{1\ \mathrm{h}}{3600\ \mathrm{s}} \times \frac{1010\ \mathrm{J}}{\mathrm{kg\ °C}} \times \left(30\ °\mathrm{C} - (-10\ °\mathrm{C})\right)$$
$$= 16699\ W$$

İletim yoluyla ısı kayıpları

Toplam duvar ve tavan alanı;

$$A = \frac{(39 + 13) \times 2 \times 2.60 + (39 \times 13)}{3} = 259\ m^2$$

Duvarlar ve tavandan iletim yoluyla ısı kaybı;

$$Q_y = 0.5 \times 259 \times \big(30 - (-10)\big) = 5183\ W$$

Zeminden iletim yoluyla ısı kaybı;

$$Q_f = 0.2 \times (39 \times 13) \times \big(30 - (-10)\big) = 4056\ W$$

Civciv döneminde ihtiyaç duyulan maksimum ısıtma kapasitesi, ısı kayıplarının toplamına eşittir. Bu durumda;

$$Q_g = 16699 + 5183 + 4056 = 25938\ W$$

Civcivlerin yaydığı duyulur ısı da dikkate alınacak olursa;

$$Q_{hc} = 10000 \times 0.33 = 3300\ W$$

Isı kazanımı, toplam kayıplardan düşülürse;

$$Q_g = 25938 - 3300 = \ 22638\ W$$

Piliç dönemi (0.5 kg) için maksimum ısıtma kapasitesinin hesaplanması

Sızma kayıpları ile oluşan havalandırma debisi

Sızma yoluyla oluşan kütlesel hava debisi için kümes hacminin 3 katı alınır. (Havanın özgül ağırlığı =1.17 [kg KH] [m^{-3} Nemli Hava])

$$V_{kümeshacim} = 39 \times 13 \times 2.6 = 1318.2\ m^3$$

$$q_{vSız} = V_{kümeshacim} \times 3$$

$$q_{vSız} = 1318.2 \times 3 = 3954.6 \frac{m^3}{h}$$

Deniz seviyesinde, 24°C ve %66 nem koşullarında havanın özgül kütlesi (ρ) 1.17 kg m^{-3} olduğundan

$$q_{vSız} = 3954.6\frac{m^3}{h} \times 1.17\frac{kg}{m^3} = 4627\frac{kg}{h}$$

$$q_{vSız} = 4627\frac{kg}{h} \times \frac{1}{3600}\frac{h}{s} = \mathbf{1.285\ kgKH\ s^{-1}}$$

Nem dengesine göre minimum havalandırma debisi

Bu dönemde iç ortam sıcaklığı 24 °C, dış ortam sıcaklığının ise -10 °C olduğu varsayıldığında;

$$m_i(24°C, \%66) = 18.8 \times 0.66 = 12.41\ g\ H2O\ KH^{-1}$$

$$m_d(-10°C, \%100) = 1.6 \times 1.0 = 1.6\ g\ H2O\ KH^{-1}$$

Piliçlerin su buharı üretimi;

$$q_{vNem,y} = \frac{10000 \times 3.9}{3600} = 10.833\ g\ H2O\ s^{-1}$$

$$q_{vNem} = \frac{10.833}{12.41 - 1.6} = \mathbf{1.002\ kgKH\ s^{-1}}$$

Karbondioksit dengesine göre minimum havalandırma debisi

İç ortamda izin verilen maksimum CO_2 3000 ppm veya %0.3'tür. Bu durumda;

$m_{CO_{2i}} = \frac{0.3}{100} \times 1.529 = 4.587 \times 10^{-3}$ kg CO_2 kg^{-1} KH olur.

Dış ortamda CO_2 300 ppm veya %0.0.3 olarak kabul edilirse, bu durumda;

$m_{CO_{2i}} = \frac{0.03}{100} \times 1.529 = 0.459 \times 10^{-3}$ kg CO_2 kg^{-1} KH olur.

0.5 kg'lık 10000 baş kapasiteli bir kümeste CO2 üretimi;

$$q_{CO2} = 10000 \times 0.97 = 9700\ L\ h^{-1}$$

Karbondioksit üretim miktarı hacimsel debiden, kütlesel debiye aşağıdaki gibi dönüştürülür (CIGR, 1984).

$$1\ L\ h^{-1}\ CO_2 = 5.121 \times 10^{-7}\ kg\ CO_2\ s^{-1}$$

$$q_{CO2,y} = 9700 \times 5.121 \times 10^{-7} = 4.97 \times 10^{-3}\ kg\ CO_2\ s^{-1}$$

Karbondioksit dengesi için minimum havalandırma debisi;

$$q_{vCO2} = \frac{4.97}{4.587 - 0.459} = \mathbf{1.20\ kg\ KH\ s^{-1}}$$

Hesaplanan havalandırma debileri incelendiğinde; $q_{vCO2} = \mathbf{1.20\ kg\ KH\ s^{-1}}$, $q_{vNem=}\ \mathbf{1.002\ kgKH\ s^{-1}}$, $q_{vSız} = \mathbf{1.285\ kgKH\ s^{-1}}$ olduğu görülmektedir. Bu durumda, $q_{vSız} > q_{vCO2} > q_{vNem}$ olduğundan dolayı en büyük değer olan $q_{vSız}$ hesaplamada esas alınır.

Havalandırma yoluyla oluşan ısı kaybı

$$Q_v = \sum q_v \times C_p \times \Delta t$$

$$Q_v = 1.285 \times 1010 \times \big(24 - (-10)\big) = 44127\ W$$

İletim yoluyla olan ısı kayıpları

Yapının toplam yüzey alanı (yan duvar ve tavan);

$$A = (39 + 13) \times 2 \times 2.60 + (39 \times 13) = 777.4\ m^2$$

Duvarlar ve tavandan iletim yoluyla ısı kaybı;

$$Q_y = 0.5 \times 777 \times \big(24 - (-10)\big) = 13209\ W$$

Zeminden iletim yoluyla ısı kaybı;

$$Q_f = 0.2 \times (39 \times 13) \times \big(24 - (-10)\big) = 3447.6\ W$$

Toplam ısı kaybı;

$$Q_g = 44127 + 13209 + 3447.6 = 60784\ W$$

Piliçlerin (0.5 kg) yaydığı duyulur ısı;

$$Q_{hc} = 10000 \times 3.3 = 33000\ W$$

Kümesin maksimum ısıtma kapasitesinin belirlenmesi için, ısı kazanımı, toplam ısı kaybından düşülür;

$$Q_e = 60784 - 33000 = \ 27784\ W$$

Maksimum Havalandırma Gereksinimi

Maksimum havalandırma gereksinimi en büyük hayvanlarda gerçekleşeceğinden, hesaplama 1.5 kg'lık piliçler baz alınarak yapılmalıdır (Çizelge 2). Kümenin, sıcaklığın %1 oranında aşıldığı bir yerde bulunduğu varsayılmaktadır ve Tablo 6.3'e göre Δt_s 2°C olarak seçilmelidir.

$$q_{v,maks} = \frac{\sum Q_t}{C_p \times \Delta t_s}$$

Çizelge 2'den yaz döneminde 1.5 kg canlı ağırlık için piliçlerin yaydığı ısı (Q_t) 4.3 W'tır. Kümesin, zamanın %1'inde sıcaklığın 27°C'yi aştığı bir konumda olduğu varsayılmıştır. Bu durumda Δt_s = 2 K alınmalıdır (CIGR, 1984; Mutaf, 2012).

$$q_{v,maks} = \frac{10000 \times 4.3}{1010 \times 2} = 21.3\ kg\ KH\ s^{-1}$$

Çizelge 3'te, 30°C'de 1 kg kuru hava için hacimsel debi ($m^3\ h^{-1}$) 3185 $m^3\ h^{-1}$ olarak verilmiştir. Bu durumda maksimum hacimsel havalandırma debisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$q_{v,maks} = 21.3 \frac{kg}{s} \times 3185 \frac{m^3 h^{-1}}{kg\ s^{-1}} = \ 67841\ m^3\ h^{-1}$$

Sonuç

Bu çalışmada, etlik piliç yetiştiriciliğinde barınak içi çevre koşullarının optimize edilmesine yönelik olarak, literatüre dayalı havalandırma gereksinimi hesaplama yöntemleri sistematik bir şekilde incelenmiş ve örnek bir kümes yapısı üzerinden uygulamalı hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ele alınan hesaplamalar doğrultusunda, yaz ve kış dönemleri için gerekli minimum ve maksimum havalandırma debileri, CO_2 dengesinin korunması için gereken hava değişim miktarları, hayvanlardan ve yapıdan kaynaklanan ısı yükleri ile ek ısıtma gereksinimleri belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, uygun havalandırma sistemlerinin sadece ısıl konforun sağlanmasında değil, aynı zamanda zararlı gazların ve nemin kontrolü yoluyla hastalık risklerinin azaltılmasında da önemli olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, özellikle tamamen kapalı sistemle çalışan modern kümeslerde, çevresel parametrelerin dikkatle izlenmesi ve bilimsel hesaplamalara dayalı olarak havalandırma sistemlerinin tasarlanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, çalışmanın, kümes hayvancılığına yönelik sürdürülebilir ve verimli iklimlendirme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, sunulan hesaplama yöntemlerinin farklı iklim koşullarına ve üretim modellerine adapte edilerek geniş bir uygulama alanına sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Bucklin, R., Jacob, J., Mather, F., Leary, J., & Naas, I. (2009). Tunnel ventilation of broiler houses (PS-46). Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Torres, A. G., & Hospitaler, A. (2015). Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. Sustainability, 7(2), 2066–2085.

Büyüktaş, K., Atılgan, A., & Tezcan, A. (2016). Tarımsal üretim yapıları (Yayın No. 101). Süleyman Demirel Üniversitesi.

Caenegem, L. v., & Wechsler, B. (2000). Acclimatization in animal houses: Data and calculation. Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, 5, 41–89.

Cave, N. A. G., Bentley, A. H., & MacLean, H. (1985). The effect of intermittent lighting on growth, feed:gain ratio, and abdominal fat content of broiler chickens of various genotypes and sex. Poultry Science, 64(3), 447–453.

CIGR. (1984). Report of Working Group on Climatization of Animal Houses. International Commission of Agricultural Engineering.

Çaylı, A., Akyüz, A., Üstün, S., & Yeter, B. (2021). Efficiency of two different types of evaporative cooling systems in broiler houses in Eastern Mediterranean climate conditions. Thermal Science and Engineering Progress, 22, Article 100844.

Drury, L. (1966). Air velocity and broiler growth in a diurnally cycled hot environment. Transactions of the ASAE, 9(3), 329–332.

Hellickson, M. A., & Walker, J. N. (1983). Ventilation of agricultural structures. American Society of Agricultural Engineers.

Lindley, J. A., & Whitaker, J. H. (1996). Agricultural buildings and structures (Vol. 1). American Society of Agricultural Engineers.

Mutaf, S., & Sönmez, R. (1984). Hayvan barınaklarında iklimsel çevre ve denetimi. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.

Mutaf, S., Tığlı, R., & Gürel, F. (1991). Climatization of poultry houses. In International Poultry Congress ’91 (pp. 83–97).

Mutaf, S. (2012). Mühendislik yaklaşımı ile hayvan barınaklarında iklimsel çevre ve denetim ilkeleri (Cilt 1). T.C. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Eğitim, Yayım ve Yayınlar Dairesi Başkanlığı.

Reece, F. N., & Lott, B. D. (1982). Heat and moisture production of broiler chickens during brooding. Poultry Science, 61(4), 661–666.

Schauberger, G., Piringer, M., & Petz, E. (2000). Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs. International Journal of Biometeorology, 43(4), 154–162.

Seedorf, J., Hartung, J., Schröder, M., Linkert, K. H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O., Metz, J. H. M., Groot Koerkamp, P. W., Uenk, G. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., & Wathes, C. M. (1998). A survey of ventilation rates in livestock buildings in Northern Europe. Journal of Agricultural Engineering Research, 70(1), 39–47. https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0274

Wilson, J. D., Albright, L. D., & Walker, J. N. (1983). Ventilation air distribution. In Ventilation of agricultural structures (pp. 25–43). American Society of Agricultural Engineers.

Zhou, Y., Bidarmaghz, A., Narsilio, G., & Aye, L. (2017). Heating and cooling loads of a poultry shed in Central Coast, NSW, Australia. World Sustainable Built Environment, 8(1), 2127–2132.

BÖLÜM 3

ARAZİ TOPLULAŞTIRMASI VE SULAMA ALTYAPISININ BÜTÜNLEŞİK PLANLANMASI: İLKELER, KAZANIMLAR VE UYGULAMA SORUNLARI

UMUT MUCAN[1]

Giriş

Arazi toplulaştırması ile sulama altyapısının bütünleşik planlanması, tarımsal üretim alanının mülkiyet düzeni, fiziksel özellikleri ve su hizmeti gereksinimleri arasında uyum kurulmasını amaçlar. Parsel sınırlarının yeniden düzenlenmesi; su iletim ve dağıtım güzergâhlarını, sulama çıkışlarının yerlerini, tarla yollarını ve drenaj bağlantılarını etkiler. Sulama şebekesinin kapasitesi, işletme biçimi ve kullanılabilir basınç ise yeni parsellerde uygulanabilecek sulama yöntemlerini sınırlar. Bu karşılıklı ilişki nedeniyle arazi düzenleme ve sulama tasarımı kararlarının aynı planlama sürecinde değerlendirilmesi gerekir. Türkiye'deki uygulamalara ilişkin araştırmalar da arazi yapısının sulama hizmetine erişim ve altyapı maliyetleri üzerindeki etkisini göstermektedir (Eğilmez & Kaman, 2022; Yağanoğlu et al., 2018).

1 Dr. Öğr. Üyesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, ORCID: 0000-0002-7126-9774

Parçalı bir tarımsal yapıda işletmenin toplam arazi varlığı, üretimin mekânsal organizasyonunu tek başına açıklamaz. Aynı büyüklükte araziye sahip iki işletmenin parsel sayısı, parsellerinin birbirine uzaklığı ve su alma noktalarına erişimi farklı olabilir. Bu farklılıklar; ekipman taşıma, sulama hazırlığı, tarımsal işlemlerin zamanlanması ve işgücü kullanımında farklı maliyetler oluşturur. Parsel sayısındaki azalma ile şekil ve dağılım özelliklerindeki değişimin birlikte incelenmesi, toplulaştırmanın etkisini daha kapsamlı biçimde değerlendirmeye olanak verir (Akkaya Aslan, 2021; Ertunç, 2020). Sulama yönünden bu değerlendirmeye, hizmetin zamanında ve yeterli miktarda sağlanıp sağlanmadığının da eklenmesi gerekir.

Bir projenin fiziksel olarak tamamlanması ile hedeflenen tarımsal hizmetin gerçekleşmesi arasında önemli bir ayrım bulunmaktadır. Şebekenin parsele kadar ulaşması, çiftçinin uygun tarla içi ekipmana sahip olduğunu veya gerekli suyu istediği dönemde alabileceğini göstermez. Benzer biçimde düzgün geometrili bir parsel, aşırı basınç kaybı bulunan bir şebeke koluna bağlandığında sulama bakımından beklenen yararı sağlayamayabilir. Planlama; tasarım, yapım ve işletme arasındaki ilişkileri başlangıçtan itibaren kurmalıdır. Basınçlı sulama sistemlerine ilişkin teknik rehberlerde, işletme senaryolarının yapım öncesinde değerlendirilmesi ve işletme verileriyle tasarımın yeniden sınanması önerilmektedir (Lamaddalena & Sagardoy, 2000).

Bu bölümün amacı, arazi toplulaştırması ile sulama altyapısının bütünleşik planlanmasını teknik, ekonomik, çevresel ve yönetsel boyutlarıyla değerlendirmektir. Bölüm, seçilmiş araştırma makaleleri ile teknik rehberlerin tematik incelemesine dayanmaktadır. Literatür; parsel düzeni, şebeke tasarımı, uygulama koşulları ve işletme performansı eksenlerinde ele alınmıştır. Türkiye'den örnekler, uluslararası çalışmalarla birlikte değerlendirilmiş; araştırmalarda bildirilen kazanımlar kendi proje

koşulları içinde yorumlanmıştır. Bölümde geliştirilen yaklaşım, planlama kararını beklenen etki ve ölçülebilir başarı göstergesiyle ilişkilendirmektedir. Böylece yalnızca uygulamanın sağlayabileceği yararların sıralanması yerine, bu yararların hangi koşullarda ortaya çıkabileceği ve nasıl doğrulanabileceği tartışılmaktadır.

Arazi toplulaştırması ve sulama altyapısı arasındaki işlevsel ilişki

Arazi toplulaştırması; parçalanmış, dağınık veya işletilmesi güç arazi düzeninin yeniden ele alınmasına olanak sağlayan bir arazi yönetimi aracıdır. Kapsamlı uygulamalarda parsel düzenlemesine ulaşım, drenaj, sulama ve çevresel düzenlemeler eşlik edebilir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütünün (FAO) yaklaşımı, toplulaştırmanın kapsamının yerel gereksinimler, kurumsal kapasite ve kırsal gelişme hedefleriyle birlikte belirlenmesini öngörmektedir (FAO, 2003). Bütünleşik planlamada arazi düzenlemesinin sınırları da sulama hizmetinin fiilen sağlanabileceği alan, mevcut su kaynakları ve korunması gereken alanlarla ilişkilendirilmelidir.

İşlevsel ilişki ilk olarak parsel ve blok ölçeğinde ortaya çıkar. Parselin genişliği, uzunluğu ve eğim yönü; sulama ekipmanının yerleşimini, hatların uzunluğunu ve uygulama düzenini etkiler. Blok sınırlarının oluşturulmasında yalnızca düzgün geometrili parseller elde etme hedefiyle hareket edilmesi, topoğrafya ve doğal drenajla uyumsuz sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle her düzenleme alternatifi, tarımsal işletilebilirlik ve sulama hizmeti açısından birlikte ele alınmalıdır. Buna göre parselin biçimi kadar, su alma noktasına bağlantısı, yol cephesi ve drenaj çıkışı da tasarımın temel bileşenleri olarak kabul edilmelidir.

İkinci ilişki şebeke ölçeğindedir. Yeniden düzenlenen parseller; boru veya kanal güzergâhlarında değişiklik yapılmasını, bazı çıkışların birleştirilmesini ya da hizmet alanlarının yeniden tanımlanmasını mümkün kılabilir. Bununla birlikte çıkış sayısının

azaltılması, her zaman hizmetin iyileşmesi anlamına gelmez. Ortak bir hidranttan yararlanan işletmeler arasında sulama zamanı ve bağlantı düzeni konusunda yeni koordinasyon gereksinimleri doğabilir. Eymir örneğinde coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile oluşturulan iki basınçlı şebeke alternatifi, COPAM (Combined Optimization and Performance Analysis Model) kullanılarak değerlendirilmiştir (Arslan et al., 2024). Bu yaklaşım, mekânsal düzenleme ile hidrolik performansın birlikte incelenmesine olanak vermekte ve alternatiflerin yalnızca güzergâh uzunluğuyla değerlendirilmesini aşan bir tasarım çerçevesi sunmaktadır.

Üçüncü ilişki işletme ölçeğinde değerlendirilmelidir. Sulama suyunun dağıtım takvimi, enerji maliyetleri, ürün deseni ve çiftçinin yatırım olanakları, düzenlenmiş arazinin kullanımını belirler. İspanya'daki iki çalışma alanını inceleyen araştırmada, sulama altyapısının geliştirilmesinde kurumsal ve sosyal etkenlerin belirleyici olduğu; çiftçilerin ekonomik güvenliğine ilişkin sonuçların ise farklılaştığı bildirilmiştir (Frey et al., 2024). Bu bulgu, bütünleşik planlamanın mülkiyet ve teknik proje kadar, altyapıyı kullanacak işletmelerin koşullarına da dayanması gerektiğini göstermektedir. Parsel planı ile işletme planı arasında bağlantı kurulması, yatırımın kullanılabilir bir hizmete dönüşmesinin temel koşullarından biridir.

Bütünleşik planlamanın ilkeleri ve aşamaları

Ortak veri altyapısı ve mevcut durumun belirlenmesi

Planlamanın ilk aşamasında, arazi ve suyla ilgili bilgilerin ortak bir mekânsal veri altyapısında birleştirilmesi önerilmektedir. Bu altyapı; kadastro ve mülkiyet kayıtlarını, fiilî arazi kullanımını, sayısal yükseklik modelini, toprak özelliklerini, mevcut sulama ve drenaj tesislerini, yolları ve koruma alanlarını kapsamalıdır. Veri katmanlarının koordinat sistemi, ölçüm tarihi ve doğruluk düzeyleri açıkça tanımlanmalıdır. Özellikle parsel sınırı ile şebeke elemanının

farklı tarihlerde üretilmiş haritalarda temsil edilmesi, tasarımda gerçekte bulunmayan bağlantılar oluşturabilir. Bu nedenle masa başında birleştirilen bilgilerin kritik noktalarda arazi gözlemleriyle doğrulanması gerekir.

Ortak veri modelinde her parselin mülkiyet kimliği ile sulama hizmeti kimliği ilişkilendirilmelidir. Tek bir hidrantın birden fazla parsele hizmet vermesi veya toplulaştırma sonrasında eski parselin birkaç yeni parsele karşılık gelmesi gibi durumlar ayrıca kaydedilmelidir. Bağlantı ilişkilerinin korunması, tasarım revizyonlarının hangi işletmeleri ve şebeke kesimlerini etkilediğinin izlenmesini sağlar. CBS destekli yeniden dağıtım modellerinin karşılaştırılmasına ilişkin çalışmalar, farklı planlama alternatiflerinin mekânsal karar desteğiyle değerlendirilebileceğini göstermektedir (Uyan et al., 2015). Böyle bir sistemde değişikliğin gerekçesi, tarihi ve sorumlusunun kaydedilmesi de veri bütünlüğünün bir parçası olarak ele alınmalıdır.

Mevcut durum değerlendirmesinin çıktısı, yalnızca bir envanter haritası olmamalıdır. Suya erişemeyen parseller, basınç yetersizliği görülen kollar, yüzey akışının yoğunlaştığı alanlar ve ulaşım güçlüğü bulunan işletmeler aynı proje alanında işaretlenmelidir. Önceliklendirme; sorunun yaygınlığı, üretim üzerindeki etkisi ve çözümün diğer bileşenlere bağımlılığına dayanır. Örneğin drenaj çıkışı bulunmayan bir blokta önce sulama kapasitesini artırmak, sorunun kaynağını çözmeyebilir. Başlangıç verilerinin aynı zamanda işletme sonrası karşılaştırmaya elverişli olması, ileride projenin etkisinin değerlendirilmesini kolaylaştıracaktır.

Su kaynağı, ürün deseni ve sulama hizmetinin tanımlanması

Sulama altyapısının hizmet alanı ve kapasitesi, kullanılabilir suyun miktarı ve mevsim içindeki dağılımı dikkate alınarak belirlenmelidir. Yıllık toplam su hacminin yeterli görünmesi,

bitkilerin en yüksek su gereksinimine sahip olduğu dönemde yeterli debinin sağlanabileceğini göstermez. Planlamada bitkilerin gelişme dönemleri, etkili yağış, toprakta depolanan su ve sulama aralığı birlikte değerlendirilmelidir. FAO-56 yaklaşımı, standart koşullardaki bitki evapotranspirasyonunu referans evapotranspirasyon ve bitki katsayısı ilişkisiyle hesaplamaktadır. Bu hesap, tarla su dengesi ve seçilen uygulama koşullarıyla birlikte sulama gereksiniminin belirlenmesine temel oluşturur (Allen et al., 1998).

Burada planlama için ayrılması gereken üç büyüklük bulunmaktadır: bitkinin su tüketimi, tarla girişinde gerekli sulama suyu ve şebeke başından sağlanması gereken su. Bu büyüklükler, aynı mekânsal sınırı temsil etmedikleri için birbirlerinin yerine kullanılmamalıdır. Talep tablosunda her hesap adımı için alan, zaman aralığı, su hacmi ve kullanılan katsayılar gösterilmelidir. Tarla uygulamasına ilişkin varsayımlar değiştiğinde şebeke talebinin nasıl değiştiği böylece izlenebilir. Kaynağın güvenilirliği düşük olduğunda, alanı büyütme hedefinin mevcut kullanıcıların hizmet yeterliliği ve kaynakta bırakılması gereken suyla birlikte değerlendirilmesi gerekir.

Ürün deseni sabit bir tasarım girdisi olarak kabul edildiğinde, gelecekteki talep değişiklikleri gözden kaçabilir. Bütünleşik projelerde başlangıçtaki ürün deseninin yanında, su talebinin yoğunlaştığı bir alternatif ve kaynak kısıtının belirginleştiği bir alternatifin değerlendirilmesi önerilmektedir. Senaryoların amacı, geleceği kesin olarak tahmin etmekten çok, tasarımın hangi koşullarda yetersiz kalacağını belirlemektir. Sulama modernizasyonunun İspanya'daki etkilerine ilişkin değerlendirme de teknik değişimin kaynak kullanımı ve sosyoekonomik sonuçlarla birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Berbel et al., 2019). Senaryolar için kullanılan ürün alanları ve sulama süreleri çiftçilerin fiilî uygulamalarıyla karşılaştırılmalıdır.

Parsel düzeni ile hidrolik tasarımın birlikte geliştirilmesi

Parsel ve blok alternatifleri hazırlanırken sulama çıkışlarının yeri, hizmet vereceği alan ve gerekli bağlantı koşulları eş zamanlı olarak belirlenmelidir. Su alma noktasının parsel sınırında bulunması, bağlantı hattının uygun uzunlukta olmasını ve tarla içi işletmeye elverişli bir konumda yer almasını da gerektirir. Parsel büyüklükleri arasında önemli farklar varsa, aynı çıkış debisinin bütün kullanıcılara tahsis edilmesi farklı sulama süreleri doğuracaktır. Çıkış özellikleri; sulanacak alan, yöntem, talep süresi ve işletme biçimi dikkate alınarak tanımlanmalıdır.

Basınçlı şebekelerde hidrolik kontrol, sistemin farklı eş zamanlı kullanım koşullarındaki davranışını kapsamalıdır. Özellikle yüksek kotlu, uzak veya sürtünme kayıplarının yoğunlaştığı çıkışlar ayrıca incelenmelidir. Basınca bağlı modelleme, çıkıştaki debinin kullanılabilir basınçtan etkilendiği koşulları değerlendirmek için önemli bir araçtır (Lamaddalena & Pereira, 2007). Hidrolik yetersizlik belirlendiğinde tasarımın diğer bileşenleri de yeniden gözden geçirilmelidir. Bir çıkışın yetersiz hizmet alması durumunda çözüm; güzergâh, çap, hizmet alanı veya işletme programında yapılacak değişikliklerin birlikte karşılaştırılmasıyla aranmalıdır. Yalnızca daha yüksek pompa basıncı seçmek, enerji ve aşırı basınç sorunları doğurabileceğinden bütün alternatifler içinde değerlendirilmelidir.

Açık kanal sistemlerinde ise güzergâhın topoğrafyayla ilişkisi, su seviyesi, kontrol yapıları ve mansaba hizmet götürme koşulları öne çıkar. Mevcut şebekenin yenilenmesinde korunabilecek tesisler belirlenmeli; önceki yatırımların yaşı ve işletme durumu kayıt altına alınmalıdır. Modernizasyonun hizmet odaklı ele alınması, kullanıcının beklediği su miktarı, zamanlama ve işletme esnekliğinin teknik düzenlemelerle ilişkilendirilmesini sağlar (Renault et al., 2007). Bu nedenle mevcut bir açık kanal sisteminin iyileştirilmesi ile borulu sisteme dönüştürülmesi, aynı

hizmet hedefi ve değerlendirme dönemi üzerinden karşılaştırılmalıdır.

Yol, drenaj ve çevresel düzenlemelerin eşgüdümü

Tarla yollarının planlanmasında her parsele ulaşım sağlanması, tarımsal taşıma güzergâhlarının sürekliliği ve tesislere bakım erişimi birlikte değerlendirilmelidir. Sulama boruları ile yolların aynı koridorda bulunması bazı yapım ve erişim avantajları sağlayabilir; ancak bakım sırasında yolun kullanılamaması veya ağır araç yüklerinin hat üzerinde oluşturacağı etkiler de dikkate alınmalıdır. Koridor planında geçiş yapıları, vana ve hidrantların konumu, yol kenarı drenajı ve bakım çalışma alanları açıkça gösterilmelidir. Arazi düzeni ile mekanizasyon arasındaki ilişki, toplulaştırma projelerinin ulaşım ve çalışma süreleri üzerinden değerlendirilmesinde de görülmektedir (Kuzu & Değirmenci, 2020).

Drenaj, sulama planının ayrılmaz bir bileşeni olarak değerlendirilmelidir. Parsel sınırları değiştiğinde yüzey suyunun izlediği güzergâhların, mevcut drenlerin ve alıcı ortam bağlantılarının korunup korunmadığı kontrol edilmelidir. Yeni bir yol dolgusu, doğal akış yönünde bir engel oluşturabilir; yalnızca parsel geometrisine odaklanan bir değerlendirme bu etkiyi gözden kaçırabilir. Sulama ve drenaj tasarımlarının aynı topoğrafik model üzerinde kontrol edilmesi, bu tür uyumsuzlukların belirlenmesini kolaylaştırır. Araziye daha fazla su verilmesinin planlandığı kesimlerde drenajın işletme koşulları ve su kalitesinin izlenmesi de önceden tanımlanmalıdır.

Çevresel düzenlemeler bakımından korunacak ağaç sıraları, dere kenarları, sulak alanlar ve diğer peyzaj öğeleri başlangıç haritasına işlenmelidir. İspanya'da toplulaştırmayla birlikte yürütülen sulama gelişiminin parsel büyümesi ve peyzaj öğelerinin kaldırılmasıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Frey et al., 2024). Proje alternatiflerinde bu tür değişikliklerin ayrı bir maliyet veya çevresel

etki kalemi olarak gösterilmesi önerilmektedir. Tarımsal işletilebilirlik hedefinin, ekolojik bağlantıların korunması ve doğal akışın sürdürülmesiyle birlikte değerlendirilmesi, çevresel etkilerin proje sonuna bırakılmasını önleyebilir.

Alternatiflerin seçimi ve uygulama sıralaması

Alternatiflerin değerlendirilmesinde ortak bir hizmet tanımı kullanılmalıdır. Farklı net alanlara, farklı talep düzeylerine veya farklı hizmet güvenilirliklerine sahip projelerin yalnızca toplam yatırım bedelleriyle karşılaştırılması yanıltıcı olabilir. Karşılaştırma tablosunda her alternatif için hizmet alanı, kullanılabilir su, tasarım talebi, basınç veya su seviyesi koşulu, yatırım tutarı ve yıllık işletme gereksinimi birlikte verilmelidir. Bazı ölçütler tercih ağırlığıyla değerlendirilebilirken, güvenli işletme veya kaynak kapasitesi gibi koşulların asgari uygunluk şartı olarak tanımlanması gerekir. Planlama kararları ile bunların doğrulanması arasındaki ilişki Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Bütünleşik planlamada kararlar ve doğrulama göstergeleri

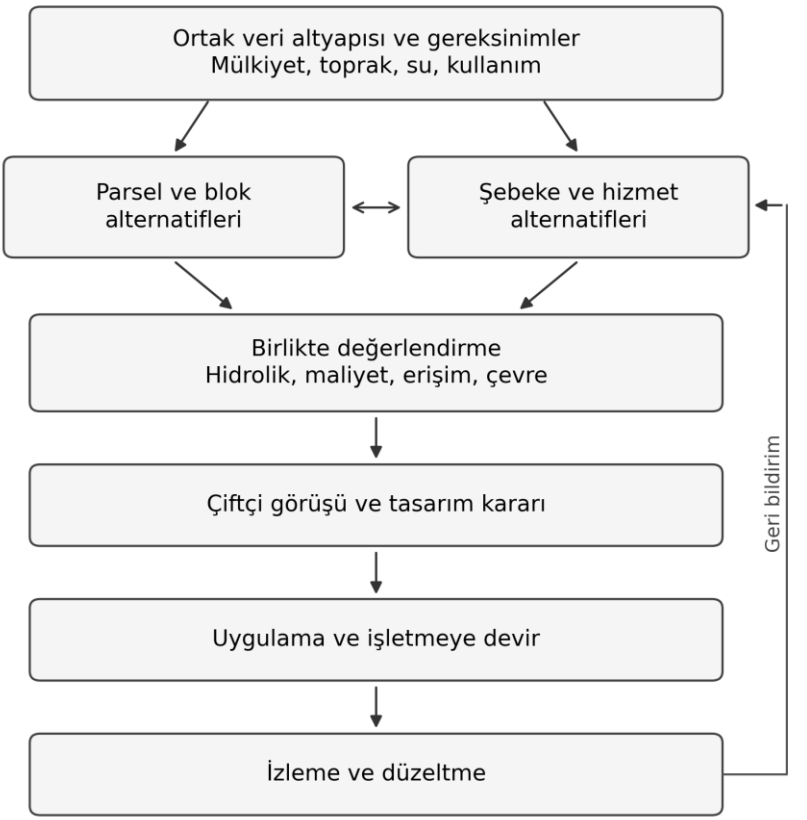
Planlama kararı	Birlikte değerlendirilecek unsurlar	Doğrulama göstergesi
Su kaynağı ve talep	Mevsimsel su, ürün deseni, sulama süresi ve hizmet alanı	Dönemsel su bütçesi; kritik dönemde talep karşılama
Parsel ve blok düzeni	Şekil, eğim, toprak, işletme dağılımı ve bağlantılar	İşletilebilirlik; gerçek ulaşım mesafesi; sulama erişimi
Su alma noktaları	Hizmet alanı, debi, basınç ve ortak kullanım	Çıkış bazında hizmet yeterliliği ve kullanıcı erişimi
Şebeke tasarımı	Güzergâh, kapasite ve farklı kullanım koşulları	Hidrolik yeterlilik; yatırım ve işletme gideri

Planlama kararı	Birlikte değerlendirilecek unsurlar	Doğrulama göstergesi
Yol ve bakım koridoru	Tarla erişimi, hat geçişleri ve tesis bakımı	Erişim sürekliliği; bakım yapılabilirliği
Drenaj ve çevre	Akış yönleri, alıcı ortam ve korunacak peyzaj öğeleri	Drenaj bağlantısı; su kalitesi; koruma alanlarının durumu
Uygulama ve işletme	Parsel planı, yapım takvimi ve kullanıcı hazırlığı	Uygulama uyumu; hizmete geçiş ve düzeltme kayıtları

Kaynak: Literatür değerlendirmesine dayanılarak yazar tarafından oluşturulmuştur (Lamaddalena & Sagardoy, 2000; Malano & Burton, 2001; Uyan et al., 2015).

Uygulama sıralamasında parsel planının kesinleşmesi, güzergâhların araziye uygulanması ve kalıcı tesislerin yapımı arasında teknik bir eşgüdüm kurulmalıdır. Mülkiyet ve parsel düzeniyle ilgili süreçler sürerken, daha sonra değişmesi olası bir güzergâhta geri dönüşü maliyetli yapım işlerine başlanması proje riskini artırabilir. Bütünleşik planlamanın karar döngüsünde, çiftçi görüşleri ile hidrolik ve ekonomik değerlendirme tasarımın son kontrolünde yeniden birleştirilir. Uygulama sonrasında elde edilen işletme verileri de sonraki düzeltmeler için başlangıç veri altyapısına aktarılır. Bu süreç Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1. Bütünleşik planlamada tasarım, uygulama ve izleme döngüsü



Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Teknik, ekonomik ve çevresel kazanımlar

Bütünleşik planlamanın teknik kazanımları, şebeke ile parseller arasındaki uyumun iyileştirilmesi üzerinden ortaya çıkar. Uygun güzergâhlar, erişilebilir su alma noktaları ve işletme alanlarının düzenlenmesi, sulama hizmetinin daha yönetilebilir hâle gelmesini sağlayabilir. Daphan Sulaması üzerine yapılan çalışma, parçalı arazi yapısının sulama, drenaj ve ulaşım hizmetleri

bakımından oluşturduğu güçlükleri birlikte ele almaktadır (Yağanoğlu et al., 2018). Ancak bir projede elde edilen toplulaştırma oranının, başka bir projedeki sulama hizmetinin düzeyini doğrudan temsil etmesi beklenmemelidir. Parsel düzenindeki değişimin hidrolik ve işletme sonuçları ayrıca ölçülmelidir.

Ekonomik kazanım değerlendirmesinde ilk yatırım ile işletme giderlerinin ayrılması gerekir. Daha kısa bir boru güzergâhı yatırım bedelini azaltabilir; buna karşılık yetersiz çap seçimi enerji gereksinimini veya bakım riskini artırabilir. Toplam ekonomik değerlendirme, ortak bir dönem ve fiyat düzeyinde yatırım, enerji, bakım, yenileme ve işletme giderlerini kapsamalıdır. Yenisu örneğinde proje ve enerji maliyetlerindeki değişimin su dağıtım yöntemine göre farklılaşması, değerlendirme sonuçlarının işletme varsayımlarına duyarlı olduğunu göstermektedir (Akkaya et al., 2017). Bu nedenle maliyet azalması için tek bir oranı bütün toplulaştırma projelerine genellemek uygun değildir.

Malatya'daki üç yerleşimi ele alan araştırmada parsel sayısının 3.125'ten 1.188'e, ortalama parsel büyüklüğünün 1,94 hektardan 5,1 hektara değiştiği; toplam keşif bedelinde ise %32 azalma gerçekleştiği bildirilmiştir (Küsek, 2014). Bu sonuçlar, arazi düzenlemesi ve altyapı maliyetinin birlikte değerlendirilmesine ilişkin somut bir örnek oluşturmaktadır. Bununla birlikte geçmiş yıllardaki parasal değerler, güncel bir projenin bütçesine doğrudan taşınmamalıdır. Ekonomik karşılaştırmada fiziksel miktar değişiklikleri ile fiyat değişiklikleri ayrı tutulmalı; boru uzunluğu, çap dağılımı ve yapı sayısı gibi kalemler güncel birim fiyatlarla yeniden değerlendirilmelidir.

Tarımsal işletme yönünden sağlanabilecek yararlar arasında ulaşım süresinin, ekipman kurma ve toplama gereksiniminin ve parsel başı dönüş kayıplarının azalması bulunmaktadır. Misli Ovası'ndaki dört yerleşimde seçilen 96 işletmeye dayanan çalışmada, toplulaştırma sonrasında hesaplanan yakıt tüketimi ve

toplam üretim süresinde azalmalar bildirilmiştir (Kuzu & Değirmenci, 2020). Bu tür kazanımların sulama enerji tüketiminden ayrı gösterilmesi önerilmektedir. Tarımsal işlemlerde kullanılan yakıtın azalması ile pompalamada kullanılan elektriğin azalması, farklı mekanizmaların sonuçlarıdır. Proje değerlendirmesi bu ayrımı koruduğunda çiftçinin toplam maliyetindeki değişim daha anlaşılır hâle gelir.

Çevresel kazanımlar değerlendirilirken su çekimi, tarla uygulaması ve tüketim arasındaki ayrım önem taşımaktadır. Bir şebekede iletim kaybının azalması, havza ölçeğinde aynı miktarda suyun kullanılabilir kalacağı anlamına gelmeyebilir. Üst Rio Grande Havzası için yapılan bütünleşik analiz, su tasarrufu amacı taşıyan teknik değişikliklerin geri dönüş akımları ve su tüketimiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir (Ward & Pulido-Velazquez, 2008). Batı Kansas'taki araştırmada da daha etkin sulama teknolojisine geçişin, ürün desenindeki değişikliklerle birlikte yeraltı suyu çekimini artırabildiği belirlenmiştir (Pfeiffer & Lin, 2014). Bu çalışmalar toplulaştırmanın etkisini doğrudan ölçmemektedir; bütünleşik projelerde su kazanımlarının nasıl yorumlanacağına ilişkin bir ölçek çerçevesi sağlamaktadır.

Sulanan alanın genişlemesi de başarı değerlendirmesinde aynı dikkatle ele alınmalıdır. Gündüzler Sulaması'nda 2023 ve 2024 işletme dönemleri arasında sulama oranının %66'dan %92'ye yükseldiği bildirilmiştir. Araştırmada toplulaştırma öncesi ve sonrası sulama performansını doğrudan karşılaştıran bir tasarım bulunmadığı özellikle belirtilmektedir (Harman & Çakmak, 2026). Bu nedenle sonuç, düzenlenmiş arazi ve borulu şebeke koşullarındaki işletme performansı örneği olarak değerlendirilmelidir. Seçilmiş çalışmaların temel bulguları ve yorum sınırları Tablo 2'de bir araya getirilmiştir.

Tablo 2. Seçilmiş araştırmalardan bulgular ve değerlendirme sınırları

Çalışma ve bağlam	Bildirilen bulgu	Yorum sınırı
(Küsek, 2014) Malatya, üç yerleşim	Parsel sayısı 3.125'ten 1.188'e; ortalama büyüklük 1,94 hektardan 5,1 hektara değişmiştir. Toplam keşif bedelinde %32 azalma bildirilmiştir.	Değerler çalışma alanı ve fiyat dönemine özgüdür.
(Akkaya et al., 2017) Yenisu, Konya	Proje maliyeti istek sisteminde %17,4, nöbet sisteminde %6; enerji maliyeti sırasıyla %17,8 ve %18,2 azalmıştır.	Dağıtım yöntemi ve tasarım kabulleri sonuçları etkilemektedir.
(Arslan et al., 2024) Eymir	İki basınçlı şebeke alternatifi CBS ve COPAM kullanılarak değerlendirilmiştir.	Bulgular tasarım ve benzetim koşullarıyla ilişkilidir.
(Kuzu & Değirmenci, 2020) Misli Ovası, 96 işletme	Hesaplanan yakıt tüketiminde %50, toplam üretim süresinde %36 azalma bildirilmiştir.	Mekanizasyon sonuçlarıdır; sulama suyu tüketimini temsil etmez.
(Harman & Çakmak, 2026) Gündüzler Sulaması	2023–2024 dönemleri arasında sulama oranı %66'dan %92'ye yükselmiştir.	Toplulaştırmanın bağımsız nedensel etkisi ayrıştırılmamıştır.
(Frey et al., 2024) Castilla y León, iki alan	Kurumsal, sosyal ve peyzaj etkileri birlikte incelenmiş; ekonomik sonuçlar farklılaşmıştır.	İki yerel bağlam ve karma yöntemle elde edilen bulgulardır.

Kaynak: Belirtilen çalışmalardaki bulgular yazar tarafından özetlenmiştir. Oranlar farklı müdahale ve karşılaştırma koşullarına aittir; ortak bir etki büyüklüğü olarak birleştirilmemiştir.

Uygulamada karşılaşılan sorunlar ve çözüm yaklaşımları

Kurumlar arası eşgüdüm ve proje verilerinin güncelliği

Toplulaştırma, sulama, drenaj ve yol bileşenlerinin farklı takvimlerle yürütülmesi, tasarımın ortak varsayımlarını bozabilir. Bir ekipte yapılan parsel revizyonunun diğer ekipteki hidrant hizmet alanına aktarılmaması, araziye uygulama aşamasında bağlantı sorunlarına yol açabilir. Ortak veri sürümü ve karar kaydı kullanılması, ekipler arasındaki eşgüdümü güçlendirebilir. Her önemli değişiklik için etkilenen parseller, tesisler, hak sahipleri ve maliyet kalemleri belirlenmelidir. Kontrol toplantılarında yalnızca iş ilerleme yüzdeleri yerine, bileşenler arasındaki uyumsuzlukların kapatılıp kapatılmadığı izlenmelidir. Böylece koordinasyon, bilgi paylaşımından somut tasarım kontrolüne dönüşür.

Veri güncelliği açısından mülkiyet kaydı, fiilî kullanım ve işletme durumu birbirinden ayrılmalıdır. Bir arazinin maliki ile üretimi gerçekleştiren kişi farklı olabilir. Planlamanın yalnızca kayıtlı maliklerin bilgilerine dayanması, sulama zamanlaması veya tarla içi ekipman gereksinimlerinin eksik anlaşılmasına neden olabilir. Sosyal ve teknik envanter, bu kullanıcı ilişkilerini uygun veri koruma koşulları altında kaydetmelidir. Yeni parsel düzeninin uygulanmasından sonra güncellenmeyen işletme kayıtları da sulama hizmetinin izlenmesini güçleştirebilir. Bu nedenle veri güncellemesinin sorumlusu ve sıklığı, projenin işletmeye devir düzeninin bir parçası olmalıdır.

Arazi derecelendirmesi, kullanıcı katılımı ve hizmet eşitliği

Arazi derecelendirmesi ve yeniden dağıtım süreçlerinde yeni parselin değeri, yalnızca yüzölçümüne indirgenmemelidir. Toprak özellikleri, konum, ulaşım ve su hizmeti koşulları birlikte değerlendirilmelidir. Parsel dağıtımı yapılırken, sulama çıkışına erişimin ve hizmet koşullarının parsel bilgisine eklenmesi önem taşımaktadır. Yeniden dağıtım modellerini karşılaştıran araştırmada,

parsel sayısı ve ortalama parsel büyüklüğü bakımından farklı sonuçlar elde edilmiştir (Uyan et al., 2015). Bu bulgudan hareketle, model sonuçlarının kullanıcı beklentileriyle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Teknik değerlendirmede kullanılan ölçütler ve tercihlerin gerekçeleri açıklandığında, uyuşmazlıkların hangi koşullardan kaynaklandığı daha kolay anlaşılabilir.

Çanakkale'de 19 yerleşim yerinde 346 arazi malikiyle gerçekleştirilen araştırma, bilgilendirme, parselasyon planları ve yeni arazilere ilişkin görüşlerin proje sürecinin farklı aşamalarında ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır (Karaönder & Gürel, 2021). Çiftçi katılımını güçlendirmek için alternatif planlar üzerinden somut görüş alınmalıdır. Kullanıcıya yeni parseli, su alma noktası, erişim yolu ve öngörülen işletme koşulları birlikte gösterilmelidir. Ortak hidrant, parseller arası geçiş veya bakım erişimi gerektiren düzenlemelerde, kullanım sorumlulukları açıklığa kavuşturulmalıdır. Katılımın yalnızca başlangıç toplantısıyla sınırlanmaması, tasarım değişikliklerinin de anlaşılmasını sağlayacaktır.

Hizmet eşitliği, bütün çıkışlara aynı su hacminin verilmesi şeklinde yorumlanmamalıdır. İhtiyaç, sulanan alan ve önceden tanımlanan hizmet koşulları dikkate alınarak dağıtımın yeterliliği değerlendirilmelidir. Şebekenin başlangıç, orta ve uç kesimlerinde basınç, debi ve teslim zamanının karşılaştırılması, dağıtım farklılıklarını görünür kılar. Sistem ortalaması uygun görünürken belirli bir kullanıcı grubunda sürekli yetersizlik bulunması mümkündür. Bu nedenle mekânsal dağılımın izlenmesi, ortalama performans göstergesini tamamlamalıdır. Hizmet eksikliğinin tasarım, işletme veya tarla içi bağlantı kaynaklı olması, uygulanacak çözümü de değiştirecektir.

Tarla içi yatırım, enerji ve bakım koşulları

Şebeke yatırımının tamamlanması ile çiftçinin tarla içi sulama sistemini kurabilmesi aynı ekonomik kapasiteye bağlı değildir. Sulama bağlantısı, filtreleme, basınç düzenleme ve dağıtım ekipmanı için gerekli yatırımın planlama sırasında değerlendirilmesi önerilmektedir. Kullanıcıların bu bileşenlere erişimindeki farklılıklar, aynı şebekeden alınan hizmetin üretime yansımasını değiştirebilir. İspanya'daki araştırma, şebeke düzeyindeki gelişme ile çiftlik düzeyindeki yatırım kararları arasında mülkiyet ve maliyet kaynaklı farklılıklar bulunduğunu göstermektedir (Frey et al., 2024). Bu nedenle altyapı planına, ekipman uygunluğu ve kullanıcı eğitimi için uygulanabilir bir hazırlık programı eşlik etmelidir.

Enerji değerlendirmesinde toplam tüketim ile birim su hacmi başına tüketim birlikte izlenmelidir. Daha fazla alanın sulanması toplam elektrik tüketimini artırırken birim hacim başına tüketim azalabilir. Tersi yönde, daha az su verilmesi nedeniyle toplam tüketim düşebilir; bu durum tek başına pompa veya şebekenin daha etkin çalıştığını kanıtlamaz. Enerji kaydı, aynı ölçüm sınırında enerji, pompalanan hacim ve işletme süresini ilişkilendirmelidir. Alternatifler değerlendirilirken statik kot farkı, gerekli çıkış basıncı, hat kayıpları ve pompa çalışma koşulları birlikte ele alınmalıdır. Tasarım ve işletme varsayımlarının sonuçlar üzerindeki etkisi, farklı dağıtım yöntemlerini inceleyen maliyet araştırmalarında da görülmektedir (Akkaya et al., 2017).

Bakım gereksinimleri açısından vana, hidrant, dren çıkışı ve geçiş yapılarının ulaşılabilir olması önem taşır. İşletmeye devir dosyası; tesislerin uygulama sonrası konumunu, hizmet alanlarını, ekipman özelliklerini ve bakım erişim koşullarını içermelidir. Tarla yollarının mevsimsel kullanılabilirliği ve ortak hatların sorumlulukları da bu dosyada açıklanmalıdır. İşletme hizmetini esas alan modernizasyon yaklaşımı, teknik düzenlemelerin hizmet sağlayıcının kapasitesi ve kullanıcının beklentileriyle

ilişkilendirilmesini gerektirir (Renault et al., 2007). Bakımın proje bütçesi ve sorumluluk düzeni içinde tanımlanması, küçük arızaların uzun süreli hizmet kaybına dönüşmesini sınırlayabilir.

Çevresel etkiler ve belirsizliklerin yönetimi

Projelerin çevresel değerlendirmesinde, beklenen olumlu etkilerin yanında olası yan etkiler de ayrı başlıklar altında izlenmelidir. İzlemenin temel kayıtları; su kaynağından alınan hacim, sulanan alan, drenaj suyu koşulları, taban suyu gözlemleri ve korunan peyzaj öğeleridir. Bu kayıtlar, proje hedefleriyle ilişkilendirilen bir başlangıç durumuna dayanmalıdır. Teknik iyileştirmenin kaynak tüketimini azaltması bekleniyorsa, beklenen azalmanın hangi su bütçesi bileşeninde gerçekleşeceği açıkça tanımlanmalıdır. Hidroekonomik araştırmaların ortaya koyduğu ölçek ilişkileri, bu tür hedeflerin yalnızca tarla uygulama miktarıyla doğrulanamayacağını göstermektedir (Pfeiffer & Lin, 2014; Ward & Pulido-Velazquez, 2008).

Belirsizliğin yönetiminde bütün senaryolara aynı güven düzeyi atanmamalıdır. Ölçülmüş bir kot bilgisi ile gelecekteki ürün desenine ilişkin varsayım farklı niteliktedir. Her kritik girdi için veri kaynağı, belirsizlik aralığı ve sonuçlara etkisi belirtilmelidir. Kıt su yılı, enerji fiyatındaki artış veya beklenenden yoğun eş zamanlı kullanım gibi koşullar tasarımın dayanıklılığını sınamak için kullanılabilir. Her senaryoda en iyi sonucu veren tek bir çözüm bulunmadığında, kabul edilebilir hizmet düzeyini farklı koşullarda sürdüren alternatif tercih edilebilir. Bu tercih, karar vericinin öncelikleri ve proje kısıtları açıkça gösterilerek gerekçelendirilmelidir.

Başarının değerlendirilmesi ve izleme

Toplulaştırma ve sulama altyapısının ortak başarısı; arazi yapısı, hizmet düzeyi, ekonomik sonuç ve çevresel etki göstergeleriyle değerlendirilmelidir. Sulama ve drenaj

performansına ilişkin karşılaştırma rehberleri, göstergelerin kapsamı ile ölçüm sınırının önceden tanımlanmasını vurgulamaktadır (Malano & Burton, 2001). Bütünleşik proje için başlangıç kaydı, yapımın tamamlandığı durum ve işletme dönemleri ayrı aşamalar olarak ele alınmalıdır. Yapımın tamamlanması sırasında fiziksel uygunluk kontrol edilirken, işletme dönemlerinde gerçek talep ve kaynak koşulları altında hizmetin gerçekleşip gerçekleşmediği değerlendirilir.

Parsel sayısındaki azalma, kolay hesaplanan bir başlangıç göstergesidir. Ancak büyüklük, şekil ve dağılım özelliklerinin birlikte incelenmesi gerekir. Parsel şeklinin geometrik bir ideal biçime yakınlığı ile tarımsal işletilebilirlik her durumda aynı anlama gelmeyebilir. Farklı şekil ve parçalanma göstergelerini değerlendiren araştırmalar, ölçütlerin özelliklerine ve sınırlılıklarına dikkat çekmektedir (Akkaya Aslan, 2021; Ertunç, 2020). Bu nedenle izleme dosyasında, ortalama parsel büyüklüğünün yanında işletme başına parsel sayısı, gerçek ulaşım mesafesi ve sulama erişimi de tutulmalıdır. Sonuçların işletme büyüklüklerine göre ayrılması, toplam ortalamanın gizlediği farklılıkları gösterebilir.

Hidrolik izleme için seçilecek noktalar, yalnızca kolay ulaşılabilir çıkışlardan oluşmamalıdır. Yüksek kotlu ve şebeke sonundaki çıkışlar ile yoğun talep döneminde yük altında kalan kollar örnekleme düzenine alınmalıdır. Basınçlı sistemlerde basınç ve debinin birlikte değerlendirilmesi, hizmet yetersizliğinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır (Lamaddalena & Pereira, 2007). Kontrol, farklı işletme koşullarında gözlenen değerlerin tasarım varsayımlarıyla karşılaştırılmasına dayanmalıdır. Tasarımda kullanılan eş zamanlı kullanım kabulünün gerçek işletmeden belirgin biçimde farklılaşması durumunda, önce model girdileri güncellenmeli; ardından gerekli teknik veya yönetsel değişiklik değerlendirilmelidir.

Tablo 3'te önerilen gösterge seti, farklı ölçeklerdeki sonuçları aynı izleme düzeninde görünür kılmayı amaçlamaktadır. Her göstergenin pay ve paydası, birimi ve ölçüm dönemi kayıt altına alınmalıdır. Örneğin sulanan alanın büyüklüğü, su hacmi veya üretim değerindeki değişimle birlikte verilmediğinde performansın nedeni anlaşılamaz. Ürün miktarına dayalı su verimliliğinde farklı ürünlerin doğrudan toplanması da uygun olmayabilir. Karşılaştırma ürün bazında yapılmalı veya ekonomik değer kullanıldığında fiyat yılı ve hesap yaklaşımı açıkça belirtilmelidir (Malano & Burton, 2001).

Tablo 3. Bütünleşik projeler için önerilen izleme göstergeleri

Gösterge	**Tanım veya ölçüm**	**Yorumlama koşulu**
Toplulaştırma oranı	$100 \times (N_0 - N_1) / N_0$; N_0 ve N_1, önceki ve sonraki parsel sayısıdır.	Aynı proje sınırı kullanılmalı; hizmet başarısı ayrıca ölçülmelidir.
Parsel yapısı ve ulaşım	Parsel büyüklüğü, işletme başına parsel sayısı ve gerçek yol mesafesi	Ortalama yanında dağılım ve işletmeler arası fark verilmelidir.
Sulama hizmetine erişim	100 × hizmet alabilen alan / net proje alanı	Bağlantı varlığı ile yeterli hizmet alabilme ayrılmalıdır.
Sulama oranı	100 × fiilen sulanan fiziksel alan / net sulama alanı	İkinci ürün alanı ayrı kaydedilmeli; payda sabit tanımlanmalıdır.
Hidrolik yeterlilik	Basınç ve debi koşullarının sağlandığı gözlem veya senaryoların payı	Kabul eşikleri ve senaryo ağırlıkları açıkça belirtilmelidir.
Enerji yoğunluğu	Tüketilen elektrik / aynı sınırdan sağlanan su hacmi (kWh/m^3)	Kot, basınç ve pompalanan hacimle birlikte değerlendirilmelidir.
Yatırım ve işletme gideri	Yatırım / net alan; yıllık işletme gideri / hizmet alanı	Fiyat yılı, kapsam ve değerlendirme dönemi aynı olmalıdır.

Gösterge	Tanım veya ölçüm	Yorumlama koşulu
Teslim suyuna göre verimlilik	Ürün miktarı / teslim edilen sulama suyu hacmi (kg/m³)	Ürün bazında hesaplanmalı; ET'ye dayalı göstergeden ayrılmalıdır.
Drenaj ve su kalitesi	Taban suyu derinliği (m); sulama ve drenaj suyunda EC (dS/m)	Mevsim, ölçüm noktası ve yerel eşikler kaydedilmelidir.
Kullanıcı ve hizmet dağılımı	Kesintiler, kullanıcı görüşleri ve baş-orta-uç kesim karşılaştırması	Ortalama performans, kullanıcı gruplarına göre tamamlanmalıdır.

Kaynak: Gösterge çerçevesi literatürden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir (Akkaya Aslan, 2021; Lamaddalena & Pereira, 2007; Malano & Burton, 2001). N: parsel sayısı; EC: elektriksel iletkenlik; ET: evapotranspirasyon. Oranlarda alan ve zaman sınırı proje başında tanımlanmalıdır.

Uzaktan algılama verileri, arazi kullanımının ve bitki gelişiminin mekânsal izlenmesinde yer ölçümlerini tamamlayabilir. Kızıltepe'de dört yerleşimi inceleyen araştırmada Sentinel-1 ile Landsat verileri kullanılarak toplulaştırma öncesi ve sonrası bitki örtüsü ve nem göstergelerindeki değişimler değerlendirilmiştir. Araştırmada mevsim başındaki olumlu değişimlerle birlikte ilerleyen aylarda süren su stresi de bildirilmiştir (Yilgan & Dogan, 2026). Bu bulgu, izleme zamanının sonuçların yorumunu etkileyebileceğini göstermektedir. Bitki indekslerindeki değişiklikler; ürün türü, gelişme dönemi ve meteorolojik koşullarla birlikte ele alınmalı; doğrudan sulama hacmi veya su tasarrufu ölçümü olarak kullanılmamalıdır.

Etkilerin değerlendirilmesinde önce-sonra karşılaştırmasının yanında, değişimin başka nedenlerle açıklanıp açıklanamayacağı da incelenmelidir. Yağışlı bir yıl, ürün fiyatlarındaki yükseliş veya işletme yönetimindeki değişiklik, toplulaştırma sonrasında gözlenen olumlu sonucu etkileyebilir. Bu amaçla, mümkün olduğunda benzer koşullara sahip karşılaştırma alanları ve birden fazla işletme

döneminden yararlanılmalıdır. Kontrol alanı bulunmadığında sonuçlar betimleyici düzeyde sunulmalı; değişimin tamamı tek bir müdahaleye bağlanmamalıdır. Gündüzler örneğinde araştırmacıların nedensel yorumun sınırını açıkça belirtmesi, bu bakımdan yararlı bir uygulamadır (Harman & Çakmak, 2026).

İzlemenin son aşaması, verinin karara dönüştürülmesidir. Sürekli düşük basınç gözlenen bir kol, drenaj sorunu gelişen bir blok veya ortak hidrant kullanımında tekrarlanan uyuşmazlıklar için sorumlu birim ve düzeltme takvimi belirlenmelidir. Böylece göstergeler yalnızca raporlama amacıyla üretilmez; bakım, işletme ve gerekli tasarım düzeltmelerinin önceliklendirilmesine hizmet eder. Her önemli düzeltme sonrasında aynı göstergeler yeniden değerlendirilmelidir. Bu süreç, arazi düzeni ile sulama altyapısı arasındaki uyumun işletme boyunca korunmasına yardımcı olacaktır.

Sonuç ve öneriler

Arazi toplulaştırması ve sulama altyapısının bütünleşik planlanması; parsel düzeni, su hizmeti, ulaşım, drenaj ve işletme gereksinimlerinin aynı karar sürecinde değerlendirilmesine dayanır. Bu yaklaşımın temel katkısı, bir bileşende yapılan düzenlemenin diğer bileşenlerde oluşturduğu etkileri tasarım aşamasında görünür kılmasıdır. Literatürde bildirilen maliyet, ulaşım ve hizmet kazanımları, bütünleşik yaklaşımın uygulama potansiyelini göstermektedir. Ancak kazanımların büyüklüğü; topoğrafya, su kaynağı, başlangıçtaki parsel yapısı, dağıtım yöntemi ve işletme koşullarına bağlıdır. Bu nedenle proje sonuçları, kullanıldığı bağlam ve ölçüm sınırlarıyla birlikte açıklanmalıdır.

Planlama için ilk öneri, güncel arazi ve altyapı verilerini birleştiren ortak bir bilgi düzeninin kurulmasıdır. Bu düzende her parselin su alma noktası, yol bağlantısı ve drenaj ilişkisi tanımlanmalı; tasarım değişikliklerinin diğer bileşenlere etkisi

izlenmelidir. İkinci öneri, parsel ve şebeke alternatiflerinin aynı hizmet hedefi altında karşılaştırılmasıdır. Teknik uygunluk, yatırım ve işletme giderleri, kullanıcı erişimi ve çevresel etkiler birlikte değerlendirilmelidir. Üçüncü öneri, çiftçi katılımının alternatifler üzerinden yürütülmesi ve şebeke yatırımıyla tarla içi uygulama kapasitesinin eşgüdümlenmesidir.

Uygulama sonrasında başarı değerlendirmesi, fiziksel tamamlanmanın ötesinde gerçek işletme sonuçlarına dayanmalıdır. Parsel yapısındaki değişim; hidrolik yeterlilik, hizmetin mekânsal dağılımı, birim enerji gereksinimi ve ekonomik sonuçlarla birlikte izlenmelidir. Su tasarrufu hedeflerinde şebekeden alınan su ile tüketilen su arasındaki ayrım korunmalı; alan genişlemesi ve ürün deseni değişiklikleri hesaba katılmalıdır. Çevresel izleme ise taban suyu, drenaj ve peyzaj öğelerini içerecek biçimde proje başlangıcında tasarlanmalıdır. Bütünleşik planlama, bu kayıtların işletme kararlarına geri beslenmesiyle süreklilik kazanacaktır.

Kaynakça/References

Akkaya, S., Topak, R., & Kara, M. (2017). Arazi toplulaştırmasının toplu yağmurlama şebekesi proje ve işletme maliyetlerine etkisi. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi, 6*(1), 1–9. https://izlik.org/JA85HK29SL

Akkaya Aslan, Ş. T. (2021). Evaluation of land consolidation projects with parcel shape and dispersion. *Land Use Policy, 105*, Article 105401. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105401

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Arslan, F., Sawassi, A., Derardja, B., Değirmenci, H., & Lamaddalena, N. (2024). The effects of land consolidation projects on pressurized irrigation system design and the cost: A case study from Türkiye. *Ecohydrology & Hydrobiology, 24*(3), 608–616. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.08.009

Berbel, J., Expósito, A., Gutiérrez-Martín, C., & Mateos, L. (2019). Effects of the irrigation modernization in Spain 2002–2015. *Water Resources Management, 33*(5), 1835–1849. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02215-w

Eğilmez, S., & Kaman, H. (2022). Arazi toplulaştırmasının sulama altyapısı açısından incelenmesi. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 37*(2), 171–178. https://doi.org/10.36846/CJAFS.2022.85

Ertunç, E. (2020). Analysis of the effect of land consolidation projects in terms of land fragmentation and parcel shapes: The case of Konya, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences, 13*(10), Article 350. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05344-4

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). *The design of land consolidation pilot projects in Central and Eastern Europe* (FAO Land Tenure Studies No. 6). https://www.fao.org/4/y4954e/y4954e00.htm

Frey, F., Mohr, F., Ruiz-Aragón, V., Akinyemi, F. O., & Bürgi, M. (2024). Agricultural irrigation development in Castilla y León (Spain): Driving forces and outcomes for landscape and sustainability in the 21st century. *Landscape Ecology, 39*(11), Article 193. https://doi.org/10.1007/s10980-024-01977-y

Harman, E., & Çakmak, B. (2026). Performance evaluation of irrigation efficiency, managerial effectiveness, and water economic productivity in consolidated agricultural lands: A case study of the Gündüzler Irrigation Scheme. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 14*(5), 1366–1376. https://doi.org/10.24925/turjaf.v14i5.1366-1376.8805

Karaönder, İ., & Gürel, A. (2021). Tarımsal arazi maliklerinin arazi toplulaştırma projelerinin çeşitli aşamalarındaki davranış ve görüşlerinin değerlendirilmesi: Çanakkale ili örneği. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 3*(1), 25–31. https://doi.org/10.51765/tayod.842543

Küsek, G. (2014). Sulama projeleri için arazi toplulaştırmasının tekno-ekonomik değerlendirmesi. *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 29*(1), 7–20. https://izlik.org/JA26MU69YS

Kuzu, H., & Değirmenci, H. (2020). Arazi toplulaştırma projelerinin tarımsal mekanizasyon işletmeciliğine etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 23*(3), 655–662. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.623467

Lamaddalena, N., & Sagardoy, J. A. (2000). *Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 59). FAO. https://www.fao.org/4/ah860e/ah860e.pdf

Lamaddalena, N., & Pereira, L. S. (2007). Pressure-driven modeling for performance analysis of irrigation systems operating on demand. *Agricultural Water Management, 90*(1–2), 36–44. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.02.004

Malano, H., & Burton, M. (2001). *Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector*. FAO. https://www.icid.org/BMGuidelines.pdf

Pfeiffer, L., & Lin, C.-Y. C. (2014). Does efficient irrigation technology lead to reduced groundwater extraction? Empirical evidence. *Journal of Environmental Economics and Management, 67*(2), 189–208. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2013.12.002

Renault, D., Facon, T., & Wahaj, R. (2007). *Modernizing irrigation management—The MASSCOTE approach: Mapping system and services for canal operation techniques* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 63). FAO. https://www.fao.org/4/a1114e/a1114e.pdf

Uyan, M., Cay, T., Inceyol, Y., & Hakli, H. (2015). Comparison of designed different land reallocation models in land consolidation: A case study in Konya/Turkey. *Computers and Electronics in Agriculture, 110*, 249–258. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.022

Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 105*(47), 18215–18220. https://doi.org/10.1073/pnas.0805554105

Yağanoğlu, A. V., Fayrap, A., & Yanık, R. (2018). Sulama projelerinde arazi toplulaştırmasının gerekliliği: Daphan Sulaması örneği. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 32*(2), 55–67. https://izlik.org/JA34KF62PL

Yilgan, F., & Dogan, S. (2026). Impacts of land consolidation in a semi-arid agricultural region of Türkiye using remote sensing analysis. *Environmental Monitoring and Assessment, 198*(4), Article 341. https://doi.org/10.1007/s10661-026-15195-3


BİDGE