BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK:

BİYOENERJİ, KAYNAK YÖNETİMİ VE ÇEVRESEL TEKNOLOJİLER

EDİTÖR

DOÇ. DR. HAYRETTİN KARADÖL





BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Biyosistem Mühendisliğinde Sürdürülebilirlik: Biyoenerji, Kaynak Yönetimi ve Çevresel Teknolojiler

Editör: Doç. Dr. HAYRETTİN KARADÖL

ISBN: 978-625-5057-83-9

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

İÇİNDEKİLER

EFFECTS OF COMPOST APPLICATIONS ON SOIL NITROGEN MINERALIZATION AND NUTRIENT CYCLING 1
ZEMZEM FIRAT

BIOFUEL PRODUCTION FROM INDUSTRIAL CROPS: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND SUSTAINABILITY .. 17
SUAT CUN

ANAEROBİK ÇÜRÜTME SİSTEMLERİNDE BİYOKÖMÜRÜN BİYOGAZ ÜRETİMİNE ETKİLERİ 35
ALPERAY ALTIKAT

BOYA DEGRADASYONU VE ATIK SULARDA TOHUM ÇİMLENMESİ 64
BEYHAN TAHTA, FERUDUN KOÇER

DİKEY TARIMDA KAYNAK VERİMLİLİĞİ: AYDINLATMA, İKLİMLENDİRME VE HİDROPONİK YÖNETİMİN BÜTÜNLEŞİK OPTİMİZASYONU 100
SEFA ALTIKAT

BÖLÜM 1

EFFECTS OF COMPOST APPLİCATİONS ON SOİL NİTROGEN MİNERALİZATİON AND NUTRİENT CYCLİNG

Zemzem FIRAT[1]

1. Introduction

Soils play an important role in the functioning of terrestrial ecosystems, the maintenance of biogeochemical cycles, and the provision of ecosystem services (Zheng et al., 2022). Soil fertility depends not only on meeting the nutrient requirements of plants but also on maintaining suitable physical, chemical, and biological conditions (Wang, 2022; Tudi et al., 2022). Intensive agriculture, imbalanced fertilizer use, and inappropriate tillage practices can lead to a decline in soil biodiversity, loss of organic matter, and increased erosion risk (Vergara et al., 2020). Therefore, maintaining soil organic matter is essential for sustainable agricultural production.

Soil organic matter influences the physical, chemical, and biological properties of soil. It stores nutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P), and sulfur (S), and supports their transformation into

[1] PhD, Harran University, Department of Soil Science and Plant Nutrition, Orcid: 0000-0003-4549-9389

plant-available forms through microbial decomposition and mineralization (Bashir et al., 2021; Rao et al., 2017). In addition, soil organic matter can contribute to carbon sequestration in soils (Lal, 2020).

Compost is an organic amendment obtained through the decomposition and stabilization of organic materials by microorganisms under controlled conditions (Cooperband, 2000). Appropriate composting can improve biological stability, reduce phytotoxic compounds, and support pathogen control (Day and Shaw, 2001). Compost application can also contribute to the maintenance of soil organic carbon and influence microbial biomass and enzyme activities (Bellino et al., 2015).

Nevertheless, the use of compost as a fertilizer source has certain limitations. Applying large amounts of compost to meet plant nitrogen requirements may lead to excessive accumulation of phosphorus and potassium in the soil (Möller, 2018). Furthermore, because a substantial proportion of total nitrogen is present in organic forms, the amount of nitrogen available to plants may be limited during the initial growing period. In some composts, the amount of nitrogen that becomes available during the initial period has been reported to account for approximately 5–15% of total nitrogen; however, this proportion varies depending on material characteristics and application conditions (Möller and Schultheiß, 2014). Mineralization over time, in turn, supports the long-term nitrogen-supplying potential of compost (Amlinger et al., 2003).

Nitrogen mineralization is the process by which organic nitrogen is converted into inorganic forms, such as ammonium, through microbial activity. This process is influenced by temperature, moisture, soil properties, microbial activity, and the composition of organic materials (Robertson and Groffman, 2007). The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio is an important indicator of the balance between mineralization and microbial nitrogen

immobilization. High C/N ratios may promote immobilization, whereas lower ratios may favor net mineralization. However, the decomposability of carbon and the chemical composition of organic nitrogen must also be taken into account (Lazicki et al., 2020). The C/N ratio range of 14:1–19:1 reported for certain organic amendments should not, however, be regarded as a universal threshold applicable to all materials (Gale et al., 2006).

This book chapter examines the effects of compost application on soil nitrogen mineralization and immobilization in the context of the compost properties and environmental factors that regulate these processes. Furthermore, the effects of compost on soil organic matter, microbial activity, and the cycling of other nutrients are evaluated, and the limitations associated with its agricultural use and approaches to sustainable management are discussed.

2. Compost Characteristics and Soil Nutrient Dynamics

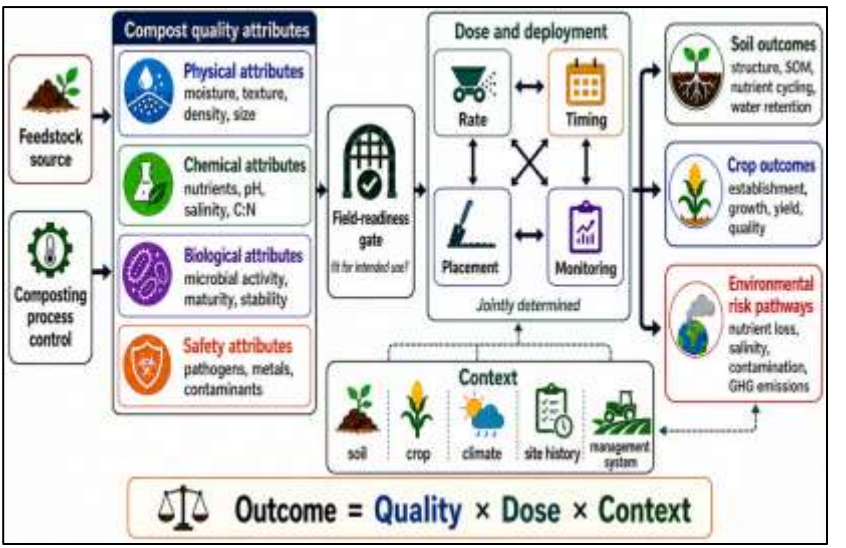
Fertilizers derived from recycled organic waste can contribute to soil fertility by improving the physical, chemical, and biological properties of soils. Organic mulch applications have been reported to influence soil physical properties, while organic amendments can alter soil structure and erodibility (Kara et al., 2021; Kara et al., 2024). Furthermore, the appropriate use of these materials can help reduce the need for phosphorus fertilizers produced from limited natural resources, such as phosphate rock, and ammonia-based nitrogen fertilizers synthesized through the Haber–Bosch process (Diacono and Montemurro, 2010).

Composting is the process of decomposing and biologically stabilizing organic materials by microorganisms under controlled conditions. When carried out under appropriate conditions, this process produces an organic soil amendment with a reduced pathogen load and properties suitable for agricultural use (Cesaro et al., 2019). During composting, the decomposition of a substantial

proportion of readily degradable organic compounds can increase the relative proportion of more stable organic components in the resulting material. This may enable compost to contribute to the preservation of soil organic carbon and, under suitable conditions, to organic matter accumulation (Fabrizio et al., 2009). Consequently, compost may have a greater potential for humus formation than many other organic fertilizers.

The effectiveness of the composting process depends on interactions among physical, chemical, and biological factors. Parameters such as bulk density, porosity, particle size, nutrient content, the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, temperature, pH, moisture, and oxygen supply play important roles in regulating microbial activity and organic matter decomposition (Richard et al., 2002; Agnew and Leonard, 2003). Karadağ et al. (2022) reported that the application of gidya, an organic material of geological origin, and gidya compost affected soil physical properties and plant dry matter production.

Figure 1. Effects of compost quality and application on soil, plants, and the environment



Source: Manono, 2026

3. Chemical Composition, C/N Ratio, and Degree of Compost Maturity

The chemical composition of compost varies according to the amounts and forms of organic carbon, total nitrogen, and nutrients such as phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sulfur. This variability arises from the characteristics of the raw materials used and the conditions under which composting takes place. During composting, ammonia (NH_3) volatilization and gaseous nitrogen emissions can lead to nitrogen losses (Bernal et al., 2017). Minimizing these losses is important for preserving the nitrogen content and fertilization potential of compost (Sommer, 2001). During maturation, nitrification can convert a proportion of ammonium nitrogen (NH_4^+-N) into nitrate nitrogen (NO_3^--N). Although nitrate can be taken up by plants, its high mobility makes it susceptible to leaching under suitable conditions. This risk depends on compost characteristics, application rate, and soil and water conditions. Some studies have reported that the use of certain composts at recommended application rates may pose a limited risk of nitrate leaching (Santos et al., 2018). Following compost application to soil, the rate and extent of organic nitrogen mineralization also vary depending on compost maturity, the decomposability of organic nitrogen, and environmental conditions (Lazicki et al., 2020; Reimer et al., 2023).

During composting, the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio is an important indicator influencing organic matter decomposition and nitrogen transformations. A high initial C/N ratio may limit the availability of nitrogen for microorganisms and slow decomposition, whereas low ratios may increase ammonia volatilization, particularly under conditions of high pH and temperature (Li and Peng, 2011). The effects of the initial C/N ratio on compost maturation and nitrogen losses have also been demonstrated in studies involving different agricultural residues (Zhan et al., 2021). Although a C/N

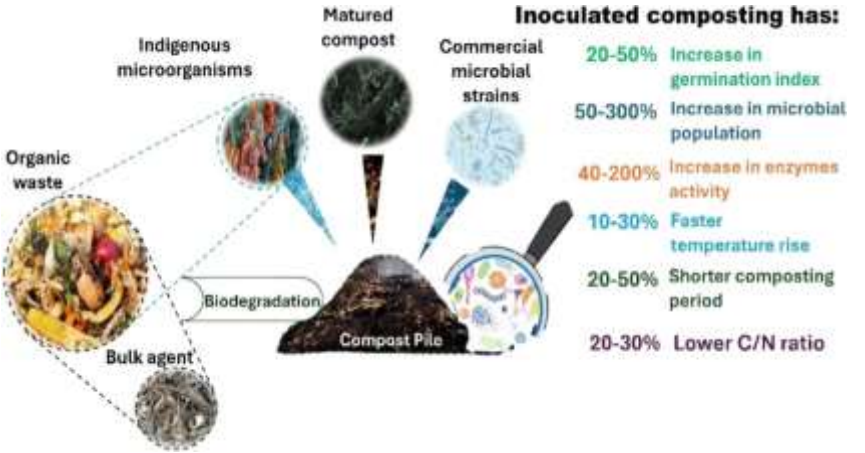
ratio of 25:1–30:1 is generally recommended, the appropriate ratio varies depending on the raw materials used and the biological degradability of carbon (Kumar et al., 2010).

Biological stability and maturity are fundamental indicators for evaluating compost quality for agricultural use (Moral et al., 2009). Biological stability refers to the relative resistance of organic compounds to microbial decomposition and can be assessed using indicators such as respiration activity (Gao et al., 2010). Maturity, in contrast, involves evaluating compost characteristics that may adversely affect plant growth and can be determined using biological tests such as the germination index (Said-Pullicino et al., 2007; Gao et al., 2010). Adequately stabilized and matured composts can contribute to the preservation of soil organic matter and support nutrient cycling (Piccolo et al., 2004). In contrast, immature composts may increase microbial nitrogen immobilization and oxygen consumption and may adversely affect plant growth through the presence of phytotoxic compounds (Bernal et al., 2009).

4. Effects of Compost on Soil Organic Matter and Microbial Activity

Compost application can contribute to improving soil fertility and enhancing the physical, chemical, and biological properties of soils by supplying organic carbon and plant nutrients (Gerke, 2022). A proportion of the organic carbon derived from compost is decomposed by microorganisms and incorporated into carbon and nutrient cycling processes, while another proportion may remain in the soil for longer periods. The balance between these processes depends on the chemical composition of the compost, application rate, soil properties, and environmental conditions. Materials rich in organic carbon and nitrogen can support sustainable crop production by influencing microbial activity and nutrient availability (Hiranmai and Vats, 2023; Fiorentino et al., 2025).

Figure 2. Effects of compost on microbial activity and the composting process



Source: Salih et al., 2025

Soil microorganisms play an important role in organic matter decomposition and in the mineralization and immobilization of nutrients. Compost application can influence microbial biomass and metabolic activity by supplying carbon and energy sources for microorganisms (Guo et al., 2024). These effects vary depending on the content of readily decomposable organic matter in the compost, its degree of maturity, and the initial properties of the soil. Changes in microbial biomass and activity affect the mineralization of organic nitrogen and the immobilization of mineral nitrogen into microbial biomass, thereby contributing to the regulation of nitrogen availability for plants.

The effects of compost application on soil enzyme activities are important for assessing organic matter decomposition and nutrient cycling. Protease and N-acetyl-β-D-glucosaminidase contribute to the decomposition of nitrogen-containing organic compounds; urease catalyzes the hydrolysis of urea; β-glucosidase is involved in the carbon cycle; and phosphatases contribute to the mineralization of organic phosphorus. Dehydrogenase activity is another important indicator used to assess the metabolic activity of

soil microorganisms. Although compost application can increase the activities of certain enzymes by supplying organic substrates, these responses vary depending on compost characteristics, application rate, soil conditions, and the function of the enzyme (Lucchetta et al., 2023).

5. Effects of Compost Application on Soil Nitrogen Mineralization

Compost application can influence the biochemical transformations of nitrogen and its availability to plants by supplying organic nitrogen and carbon to the soil. Because a substantial proportion of compost-derived nitrogen is present in organic compounds, its conversion into mineral forms available for plant uptake depends largely on microbial decomposition and mineralization processes. However, the effects of compost on nitrogen mineralization vary depending on the chemical composition of the organic material, its carbon-to-nitrogen (C/N) ratio and degree of maturity, the application rate, and soil conditions. Therefore, evaluating the nitrogen-supplying potential of compost requires consideration not only of its total nitrogen content but also of the distribution of organic and inorganic nitrogen forms, the rate of mineralization, and microbial immobilization processes (Eghball, 2000).

6. Microbial Mechanisms of Nitrogen Mineralization and Immobilization

Nitrogen mineralization is a biochemical process through which soil organic nitrogen is converted into inorganic forms by microorganisms, thereby contributing to the pool of nitrogen available to plants (Keuper et al., 2017). During the microbial decomposition of organic nitrogen compounds, ammonium (NH_4^+) is released through ammonification (Robertson and Groffman, 2007). The resulting ammonium can be taken up by plants and

microorganisms or, under suitable conditions, converted into nitrite (NO_2^-) and subsequently nitrate (NO_3^-) through nitrification. The utilization of ammonium and nitrate by microorganisms is influenced by carbon availability, substrate characteristics, and the composition of the microbial community (Recous et al., 1990; Schlesinger, 2005).

The availability of mineral nitrogen in soil is regulated not only by mineralization but also by microbial immobilization. Immobilization is the uptake of mineral nitrogen forms, such as ammonium and nitrate, by microorganisms and their incorporation into cellular organic compounds (Myrold and Bottomley, 2008). Organic materials rich in readily decomposable carbon can stimulate microbial growth and increase microbial nitrogen demand, resulting in the retention of mineral nitrogen in microbial biomass and a reduction in the amount of nitrogen available for plant uptake in the short term. Conversely, nitrogen immobilization may decrease under conditions where readily decomposable carbon is limited (Chen and Stark, 2000).

Nitrogen retained in microbial biomass can subsequently be remineralized and re-enter the soil nitrogen cycle following microbial death and the decomposition of cellular compounds. Therefore, the dynamic balance between mineralization and immobilization plays an important role in determining the amount of plant-available mineral nitrogen following compost application.

7. Compost C/N Ratio and the Decomposability of Organic Nitrogen

The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of compost is an important indicator used to assess the balance between organic nitrogen mineralization and microbial immobilization of mineral nitrogen following soil application. In general, the application of materials containing high amounts of readily decomposable carbon

relative to nitrogen can increase microbial nitrogen demand and promote net nitrogen immobilization. Conversely, net nitrogen mineralization may occur when materials have a relatively high nitrogen content and suitable levels of biologically degradable carbon. However, applying a single C/N threshold to all types of compost is inappropriate because nitrogen mineralization dynamics are influenced not only by the total C/N ratio but also by the chemical composition of carbon and the decomposability of organic nitrogen (Myrold and Bottomley, 2008).

During composting, the decomposition of a proportion of readily degradable organic compounds can increase the relative abundance of more stable organic components in mature compost. Therefore, a high total nitrogen content in compost does not necessarily mean that a proportionally equivalent amount of mineral nitrogen will be released after application. The rate of organic nitrogen mineralization can vary depending on compost maturity, biological stability, and the resistance of its organic compounds to microbial decomposition. In addition, environmental factors such as temperature, soil moisture, aeration, and pH regulate mineralization and immobilization processes by influencing microbial activity (Robertson and Groffman, 2007).

8. Limitations of Compost Application and Sustainable Management

The physical, chemical, and biological properties of compost can vary considerably depending on the raw materials used and the production conditions. Variations in maturity, biological stability, nutrient content, salinity, and potential contaminant loads determine the effects of compost on soil properties and plant growth (Qureshi et al., 2021; Głąb et al., 2025). Therefore, because compost characteristics vary according to the raw materials used, the quality and suitability of the material should be assessed before application.

9. Conclusion

Compost application can contribute to organic waste recycling, the preservation of soil organic matter, and the maintenance of nutrient cycling. However, the effects of compost on soil fertility and plant nutrition vary depending on the characteristics of the material, its degree of maturity and stability, and the conditions of the soil to which it is applied.

The availability of compost-derived nitrogen to plants is determined by the balance between mineralization and microbial immobilization. Therefore, evaluating the fertilizer value of compost requires consideration not only of its total nitrogen content but also of its mineralization potential and changes in nitrogen release over time. Furthermore, determining appropriate application rates based on soil and compost analyses, crop requirements, and nutrient balance is important for improving agronomic effectiveness and reducing environmental risks.

Future research should prioritize comparisons of the nitrogen mineralization potential of composts derived from different raw materials, investigations of mineralization–immobilization processes under long-term field conditions, and the development of management strategies that improve the synchronization of nitrogen release with plant uptake. The integrated assessment of microbial biomass, soil enzyme activities, and organic carbon dynamics would also contribute to a more comprehensive understanding of the effects of compost application on soil health and nutrient cycling. Ultimately, the effective use of compost in sustainable agriculture requires a science-based management approach that considers soil and crop requirements while accounting for potential environmental risks.

References

Agnew, J. M., & Leonard, J. J. (2003). The physical properties of compost. Compost Science & Utilization, 11(3), 238-264.

Amlinger, F., Götz, B., Dreher, P., Geszti, J., & Weissteiner, C. (2003). Nitrogen in biowaste and yard waste compost: dynamics of mobilisation and availability—a review. European Journal of Soil Biology, 39(3), 107-116.

Bashir, O., Ali, T., Baba, Z. A., Rather, G. H., Bangroo, S. A., Mukhtar, S. D., ... & Bhat, R. A. (2021). Soil organic matter and its impact on soil properties and nutrient status. In Microbiota and biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly tools for reclamation of degraded soil environs (pp. 129-159). Cham: Springer International Publishing.

Bellino, A., Baldantoni, D., De Nicola, F., Iovieno, P., Zaccardelli, M., & Alfani, A. (2015). Compost amendments in agricultural ecosystems: confirmatory path analysis to clarify the effects on soil chemical and biological properties. The Journal of Agricultural Science, 153(2), 282-295.

Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. Bioresource technology, 100(22), 5444-5453.

Bernal, M. P., Sommer, S. G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L., & Michel Jr, F. C. (2017). Current approaches and future trends in compost quality criteria for agronomic, environmental, and human health benefits. Advances in agronomy, 144, 143-233.

Cesaro, A., Conte, A., Belgiorno, V., Siciliano, A., & Guida, M. (2019). The evolution of compost stability and maturity during the full-scale treatment of the organic fraction of municipal solid waste. Journal of environmental management, 232, 264-270.

Chen, J., & Stark, J. M. (2000). Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush–crested wheatgrass soil. Soil biology and biochemistry, 32(1), 47-57.

Cooperband, L. R. (2000). Composting: art and science of organic waste conversion to a valuable soil resource. Laboratory medicine, 31(5), 283-290.

Day, M., & Shaw, K. (2001). Biological, chemical and physical processes of composting. Compost utilization in horticultural cropping systems, 17-50.

Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. Agronomy for sustainable development, 30(2), 401-422.

Eghball, B. (2000). Nitrogen mineralization from field-applied beef cattle feedlot manure or compost. Soil Science Society of America Journal, 64(6), 2024-2030.

Fabrizio, A., Tambone, F., & Genevini, P. (2009). Effect of compost application rate on carbon degradation and retention in soils. Waste Management, 29(1), 174-179.

Fiorentino, A., Rajput, F. Z., Di Serio, A., Baldi, V., Guarino, F., Baldantoni, D., ... & Castiglione, S. (2025). Role of plants and urban soils in carbon stock: Status, modulators, and sustainable management practices. Plants, 14(4), 546.

Gale, E. S., Sullivan, D. M., Cogger, C. G., Bary, A. I., Hemphill, D. D., & Myhre, E. A. (2006). Estimating plant-available nitrogen release from manures, composts, and specialty products. Journal of Environmental Quality, 35(6), 2321-2332.

Gao, M., Li, B., Yu, A., Liang, F., Yang, L., & Sun, Y. (2010). The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. Bioresource Technology, 101(6), 1899-1903.

Gerke, J. (2022). The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. Soil Systems, 6(2), 33.

Głąb, T., Gondek, K., & Mierzwa-Hersztek, M. (2025). Enhancing soil physical quality with compost amendments: Effects of particle size and additives. Agronomy, 15(2), 458.

Guo, K., Li, G., Wu, P., Yue, Y., Liu, X., Lv, Z., & Zhang, J. (2024). Compost-induced changes in microbial community reinforce the ecosystem functioning of sandy loam soil in China. Soil Use and Management, 40(4), e13145.

Hiranmai Yadav, A. N., & Vats, P. (2023). Improvement of soil health and crop production through utilization of organic wastes: A sustainable approach.

Kara, Z., Koçer, F., Çaylar, M., & Çokkızgın, A. (2024). Effect of different organic regulator application to problematic areas on soil erodibility parameters (Serpentine Soil Sample). *Black Sea Journal of Agriculture*, *7*(2), 184-189.

Kara, Z., Sesveren, S., Köylü, A., & Gönen, E. (2021). Organik malç uygulamalarının toprağın bazı fiziksel özellikleri üzerine etkileri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *4*(1), 91-95.

Karadağ, Y., Kara, Z., Reis, M., & Yakupoğlu, T. (2022). Gidya uygulamalarının vertisol toprağın bazı fiziksel özellikleri ve mürdümük veriminde meydana getirdiği değişimler. *Bozok Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, *1*(1), 1-10.

Keuper, F., Dorrepaal, E., van Bodegom, P. M., van Logtestijn, R., Venhuizen, G., van Hal, J., & Aerts, R. (2017). Experimentally increased nutrient availability at the permafrost thaw front selectively enhances biomass production of deep-rooting subarctic peatland species. Global change biology, 23(10), 4257-4266.

Kumar, M., Ou, Y. L., & Lin, J. G. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. Waste management, 30(4), 602-609.

Lal, R. (2020). Carbon sequestration in agricultural ecosystems. J. Soil Water Conserv, 75, 38A-40A.

Lazicki, P., Geisseler, D., & Lloyd, M. (2020). Nitrogen mineralization from organic amendments is variable but predictable (Vol. 49, No. 2, pp. 483-495).

Li, J., & Peng, S. (2011). Practical manual for composting engineering.

Lucchetta, M., Romano, A., Alzate Zuluaga, M. Y., Fornasier, F., Monterisi, S., Pii, Y., ... & Gaiotti, F. (2023). Compost application boosts soil restoration in highly disturbed hillslope vineyard. Frontiers in Plant Science, 14, 1289288.

Manono, B. O. (2026). Compost Quality and Application Rate as Drivers of Soil Health, Nutrient Cycling, and Crop Performance: A Critical Review and Practical Rate-Design Framework. *Nitrogen*, *7*(2), 58.

Moral, R., Paredes, C., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F., & Bernal, M. P. (2009). Utilisation of manure composts by

high-value crops: safety and environmental challenges. Bioresource Technology, 100(22), 5454-5460.

Möller, K. (2018). Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 112(2), 147-164.

Möller, K., & Schultheiß, U. (2014). Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft eV (KTBL), Darmstadt, Germany.

Myrold, D. D., & Bottomley, P. J. (2008). Nitrogen mineralization and immobilization. Nitrogen in agricultural systems, 49, 157-172.

Piccolo, A., Spaccini, R., Nieder, R., & Richter, J. (2004). Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter. Climatic Change, 67(2), 329-343.

Qureshi, T., Shoaib, H. M., Ali, U., Siddiqi, M. H., Hussain, M. A., & Lateef, H. U. (2021). Comparison of physio-chemical characteristics of different compost samples. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, 18(1), 09-17.

Rao, C. S., Indoria, A. K., & Sharma, K. L. (2017). Effective management practices for improving soil organic matter for increasing crop productivity in rainfed agroecology of India. Current science, 1497-1504.

REcous, S. Y. L. V. I. E., Mary, B., & Faurie, G. (1990). Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soils. Soil Biology and Biochemistry, 22(7), 913-922.

Reimer, M., Kopp, C., Hartmann, T., Zimmermann, H., Ruser, R., Schulz, R., ... & Möller, K. (2023). Assessing long term effects of compost fertilization on soil fertility and nitrogen mineralization rate. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 186(2), 217-233.

Richard, T. L., Hamelers, H. V. M., Veeken, A., & Silva, T. (2002). Moisture relationships in composting processes. Compost science & utilization, 10(4), 286-302.

Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2007). Nitrogen transformations. Soil microbiology, ecology and biochemistry. doi, 10, 341-364.

Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G., & Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. Bioresource technology, 98(9), 1822-1831.

Salih, H. G., Saady, N. M. C., Zhang, B., & Albayati, T. M. (2025). The role of microbial inoculum in improving composting performance and promoting compost maturation: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 100316.

Santos, A., Fangueiro, D., Moral, R., & Bernal, M. P. (2018). Composts produced from pig slurry solids: nutrient efficiency and N-leaching risks in amended soils. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2, 8.

Schlesinger, W. H. (Ed.). (2005). Biogeochemistry (Vol. 8). Elsevier.

Sommer, S. G. (2001). Effect of composting on nutrient loss and nitrogen availability of cattle deep litter. European Journal of Agronomy, 14(2), 123-133.

Tudi, M., Li, H., Li, H., Wang, L., Yang, L., Tong, S., ... & Ruan, H. D. (2022). Evaluation of soil nutrient characteristics in Tianshan Mountains, North-western China. Ecological Indicators, 143, 109431.

Vergara Cid, C., Ferreyroa, G. V., Pignata, M. L., & Rodriguez, J. H. (2020). Biosolid compost amendment increases soil fertility and soybean growth. Journal of Plant Nutrition, 44(8), 1131-1140.

Wang, X. (2022). Managing land carrying capacity: Key to achieving sustainable production systems for food security. Land, 11(4), 484.

Zhan, Y., Wei, Y., Zhang, Z., Zhang, A. K., Li, Y., & Li, J. (2021). Effects of different C/N ratios on the maturity and microbial quantity of composting with sesame meal and rice straw biochar. Biochar, 3(4), 557-564.

Zheng, W., Rao, C., Wu, Q., Wang, E., Jiang, X., Xu, Y., ... & Yan, W. (2022). Changes in the soil labile organic carbon fractions following bedrock exposure rate in a karst context. Forests, 13(4), 516

BÖLÜM 2

BIOFUEL PRODUCTION FROM INDUSTRIAL CROPS: POTENTIAL, TECHNOLOGIES, AND SUSTAINABILITY

Suat CUN[1]

1. Introduction

The continuous increase in global energy demand, the limited availability of fossil fuel reserves, and the adverse effects of greenhouse gas emissions on climate change have made the transition toward renewable energy sources imperative (Cherubini and Strømman, 2011). The transportation sector accounts for a substantial proportion of total greenhouse gas emissions, and biofuels play a strategic role in heavy-duty transport, maritime shipping, and aviation, where electrification remains challenging. Biofuels, particularly in the forms of biodiesel, renewable diesel (hydrotreated vegetable oil-HVO), and sustainable aviation fuel (SAF), are considered important alternatives because their "drop-in" characteristics allow them to be used with existing engines and fuel distribution infrastructure (Energy, 2023; Stillwater Publications, 2025). Lipid- and carbohydrate-based feedstocks play a critical role in the production of these fuels. Industrial crops-including oilseed

[1] Dr, Harran University, Department of Field Crops, Orcid: 0000-0001-6607-8263

crops (sunflower, soybean, rapeseed/canola, safflower, castor bean, flax, and hemp), starch- and sugar-producing species, and crops with high lignocellulosic biomass potential-serve as key feedstocks in both first- and second-generation biofuel production chains (Demirbas, 2008; Naik et al., 2010; Nikolić et al., 2025).

Biofuels are traditionally classified according to their generation. First-generation biofuels include ethanol and biodiesel produced from food crops such as soybean, rapeseed, sunflower, maize, and sugarcane, whereas second-generation biofuels rely on non-food lignocellulosic biomass, waste oils, and energy crops that can be cultivated on marginal lands (Sims et al., 2010; Russo et al., 2025). Third- and fourth-generation biofuels involve microalgae, metabolic engineering, and synthetic biology applications (Brennan and Owende, 2010; Luo et al., 2022; Maitra et al., 2024). Criticism of first-generation approaches due to the "food-versus-fuel" dilemma and the risks of indirect land-use change (ILUC) has accelerated the shift toward second-generation biofuels and intermediate cropping systems (Change, 2008; Fargione et al., 2008; Russo et al., 2025). Recent life cycle assessment (LCA) studies have demonstrated the decisive influence of feedstock selection on carbon intensity, indicating that waste oils and crops cultivated on marginal lands generally offer lower-emission profiles (Cherubini and Strømman, 2011; Russo et al., 2025).

This chapter provides a comprehensive examination of the role of industrial crops in biofuel production, focusing on their production and consumption status worldwide and in Türkiye, agronomic characteristics, production technologies, biotechnological improvements, life cycle assessments (LCA), policy dimensions, and future prospects.

2. General status of biofuels worldwide and in Türkiye

2.1. Global Biofuel Production and Consumption

Global liquid biofuel production increased by approximately 8% in 2024 compared with the previous year. The United States (37%) and Brazil (22%) were the largest producers (Energy, 2023). In the United States, soybean oil is the most widely consumed vegetable oil in the biofuel sector (Stillwater Publications, 2025). In Türkiye, although sunflower is the dominant oilseed crop, the biofuel potential of industrial crops such as safflower, hemp, and cotton is increasingly being investigated (Karabaş, 2013; Koç and Hamzaoğlu, 2025; KTAE, 2024).

Table 1. Major Feedstock Shares in Global Biodiesel Production

Feedstock	Share (%)	Major countries
Palm oil	36	Indonesia, Malaysia
Soybean oil	23	USA, Brazil
Rapeseed/canola oil	14	EU, Canada
Waste cooking oil	14	EU, USA
Other	13	Russia, Türkiye, Ukraine, Argentina

Source: Nikolić vd. (2025); Stillwater Publications (2025); Energy, 2023).

Globally, a substantial proportion of biodiesel production is derived from palm oil (36%), soybean oil (23%), and rapeseed oil (14%), while waste cooking oils also account for a significant share (Nikolić et al., 2025). Sugarcane and maize are the dominant feedstocks for bioethanol production. Europe, particularly Germany, is a leading producer of biogas, whereas pyrolysis technologies remain largely at the pilot and demonstration stages.

Table 2. Use of industrial crops as biofuel feedstocks in major countries

Country/Region	Main crop	Annual use (million tonnes)	Main fuel type	Source
USA	Soybean and maize	6–8 (soybean)	Biodiesel and ethanol	Stillwater, 2025
EU	Rapeseed	6–7	Biodiesel	Energy, 2023
Indonesia	Palm oil	10+	Biodiesel	Nikolić et al., 2025
Brazil	Sugarcane and soybean	3–4 (soybean)	Ethanol and biodiesel	Energy Institute, 2025
Türkiye	Sunflower and safflower	Limited	Biodiesel (waste-based and imported feedstocks)	Karabaş, 2013

2.2. Situation in Türkiye

Türkiye has a biodiesel blending obligation of 0.5‰ (five per thousand), and production relies largely on waste and imported oils. Studies on safflower (Remzibey-05) and hemp (Vezir) have demonstrated the production of biodiesel that meets applicable standards (Karabaş, 2013; KTAE, 2024).

Table 3. Potential industrial crops in Türkiye

Crop	Oil/Starch content	Key study	Potential fuel	Source
Sunflower	40–50% oil	Commercial production	Biodiesel	El Marji et al., 2026
Safflower	30–40% oil	Remzibey-05; biodiesel compliant with EN 14214	Biodiesel	Karabaş, 2013
Hemp	>30% oil	Biodiesel production from the Vezir cultivar	Biodiesel and biogas	KTAE, 2024
Sugar beet	High sugar content	Domestic production	Bioethanol	-

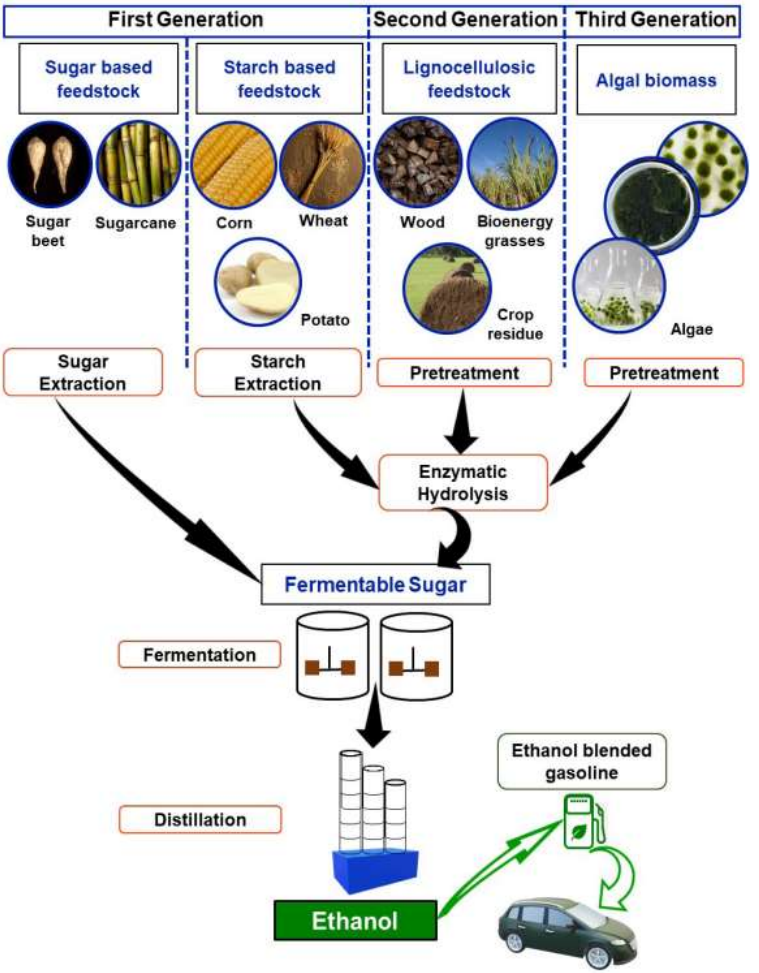
The potential of sugar beet and maize as feedstocks for bioethanol production is also being evaluated. Biogas plants operate using agricultural residues and energy crops.

3. Bioethanol production and its relationship with industrial crops

Bioethanol is produced from sugar- or starch-containing crops through fermentation or from lignocellulosic biomass through pretreatment, hydrolysis, and fermentation (Naik et al., 2010; Sims et al., 2010). First-generation bioethanol feedstocks include sugarcane, which accounts for a substantial share of global production in Brazil, maize in the United States, sugar beet, and sorghum. Sugarcane ethanol in Brazil exhibits a high energy return on energy invested (ERoEI). In the United States, maize ethanol is supported under the Renewable Fuel Standard.

Second-generation bioethanol production relies on lignocellulosic biomass derived from agricultural residues, such as maize stalks and sugarcane bagasse, energy crops such as switchgrass and miscanthus, and industrial crop residues. Pretreatment methods, including steam explosion and acid or alkaline treatment, make cellulose and hemicellulose more accessible. Enzymatic hydrolysis then releases fermentable sugars, which are converted into ethanol by yeast. Residues such as castor bean meal have also been investigated as feedstocks for bioethanol production in integrated processes (Oliva-Rodríguez et al., 2025). In Türkiye, sugar beet and maize have considerable potential; however, lignocellulosic ethanol production remains limited at the commercial scale. From an agronomic perspective, selecting high-biomass-yielding cultivars and cultivating energy crops on marginal lands can reduce competition with food production (Russo et al., 2025).

Figure 1. Schematic pathways of first-second and third-generation ethanol production



Sources: Bera et al., 2020.

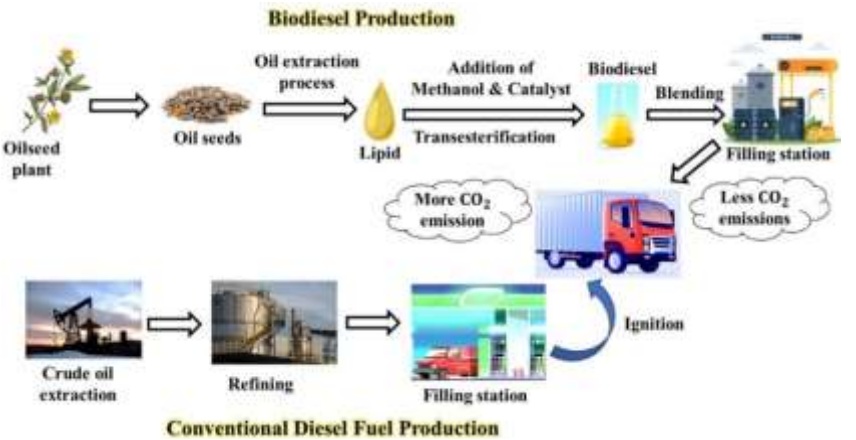
4. Biodiesel production and its relationship with industrial crops

Biodiesel is produced through the transesterification of triglycerides obtained from oilseed crops such as soybean, rapeseed, sunflower, safflower, castor bean, and camelina (Nikolić et al., 2025; Khan et al., 2023). Methanol and a catalyst are used in this process, with options including homogeneous catalysts such as NaOH and

KOH, heterogeneous catalysts such as CaO, and enzymes. The unsaturated fatty acid profiles of sunflower and safflower oils improve cold-flow properties but may reduce oxidative stability (El Marji et al., 2026). Owing to its high viscosity, castor oil requires specialized processing; yields exceeding 90% have been achieved using ultrasound-assisted methods (Oliva-Rodríguez et al., 2025).

Globally, palm oil from Indonesia and Malaysia, soybean oil from the United States and Brazil, and rapeseed oil from the European Union are the dominant feedstocks. In Türkiye, sunflower and safflower have considerable potential. Biodiesel meeting the EN 14214 standard has been produced from the Remzibey-05 safflower cultivar (Karabaş, 2013). Camelina and Brassica carinata have been cultivated as winter intermediate crops in double-cropping systems, achieving greenhouse gas (GHG) emission reductions of 75–81% (Ceriani et al., 2024). Metabolic engineering has increased vegetative triacylglycerol (TAG) accumulation in energycane and oilcane, with pilot-scale production achieving a lipid yield of 0.38 t ha^{-1} and a recovery rate of 88.7% (Maitra et al., 2024; Parajuli et al., 2020; Luo et al., 2022; Cao et al., 2023; Kannan et al., 2022).

Figure 2. Main stages of biodiesel production



Sources: Mondal et al., 2025.

5. Biogas and biomethane production and their relationship with industrial crops

Biogas is produced through the anaerobic digestion of organic matter, yielding a mixture primarily composed of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). Industrial crop residues, such as stalks, oilseed cakes, and straw, as well as energy crops such as maize silage, sorghum, and hemp, can be used as feedstocks (Sims et al., 2010). In Germany, maize silage is widely used in biogas plants, whereas in Türkiye, co-digestion systems combining agricultural residues and animal manure are common. In addition to their use in pellets and briquettes, hemp stalks also offer potential as feedstocks for biogas production (KTAE, 2024).

Biomethane is produced by upgrading biogas through the removal of CO_2, H_2S, and other impurities. It can be injected into natural gas grids or used as a vehicle fuel. In double-cropping systems, the use of camelina and castor bean meal for biogas production has contributed to total greenhouse gas (GHG) emission reductions of up to 81% (Ceriani et al., 2024). Energy crops cultivated on marginal lands can increase soil organic matter while providing sustainable feedstocks for biogas production (Russo et al., 2025). Process optimization, including the adjustment of temperature, carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, and pretreatment conditions, can improve methane yields.

6. Pyrolysis oil (bio-oil) production and its relationship with industrial crops

Pyrolysis oil (bio-oil) is a liquid product obtained by rapidly heating lignocellulosic biomass in the absence of oxygen through fast pyrolysis, typically at temperatures of 400–600 °C. Industrial crop residues, including sunflower stalks, safflower stalks, hemp stalks, sugarcane bagasse, and maize stalks, as well as energy crops, can serve as feedstocks (Naik et al., 2010; Sims et al., 2010). Bio-oil

can be upgraded in refinery processes as an alternative to crude oil or used directly as a fuel. However, its high oxygen content and acidity necessitate stabilization before many applications.

Lignocellulosic residues such as safflower and hemp stalks are suitable for pyrolysis. Studies on safflower stalk yields in Türkiye support the potential of this feedstock (Koç and Hamzaoğlu, 2025). In integrated biorefineries, pyrolysis can be combined with gasification and fermentation to improve resource utilization. Globally, pyrolysis technologies remain at the pilot and demonstration stages, and efforts are underway to reduce scale-up and bio-oil upgrading costs, particularly those associated with hydrotreatment. Lignocellulosic industrial crop residues can contribute to these processes without creating direct competition with food production.

7. First-generation oilseed industrial crops

7.1. Soybean and rapeseed/canola

Soybean and rapeseed are among the major feedstocks for global biodiesel production. During transesterification, the methanol-to-oil molar ratio, catalyst type, and reaction time determine the conversion efficiency. Khan et al. (2023) achieved high ester conversion rates and compliance with the EN 14214 standard for rapeseed and sunflower oils under optimized conditions, using molar ratios of 15:1 for rapeseed oil and 18:1 for sunflower oil at 50 °C. Soybean oil accounts for a substantial share of the biofuel sector in the United States, whereas rapeseed oil is widely used in the European Union (Stillwater Publications, 2025; Nikolić et al., 2025). The main advantages of these crops include their integration into existing agricultural systems and the added value of oilseed meal as a by-product. However, life cycle assessment (LCA) studies indicate that emissions from the agricultural production stage

contribute substantially to the overall carbon intensity of first-generation oilseed-based biofuels (Cherubini and Strømman, 2011).

7.2. Sunflower

Sunflower oil is an important feedstock, particularly in Europe and Türkiye. The unsaturated fatty acid profile of sunflower oil can improve cold-flow properties while reducing oxidative stability (El Marji et al., 2026; Nikolić et al., 2025). In Türkiye, sunflower is considered both a food crop and a potential biofuel feedstock. Its high oil yield, ranging from 1 to 3 tonnes per hectare, offers an agronomic advantage; however, its use for biofuel production may create competition with food demand.

7.3. Safflower and other oilseed crops

Safflower has considerable potential in both global and Turkish agriculture because of its adaptability to dry conditions. Karabaş (2013) demonstrated that biodiesel produced from the Remzibey-05 cultivar met the relevant standards and achieved an ester conversion rate of 98%. Castor bean has also been investigated for use in integrated production systems because of its high oil content. Oliva-Rodríguez et al. (2025) achieved biodiesel yields exceeding 90% through ultrasound-assisted extraction and optimized transesterification. They also produced bioethanol from the residual castor bean meal through enzymatic hydrolysis and fermentation.

8. Second-generation crops and crops for marginal lands

8.1. Camelina sativa and Brassica carinata

These species can be cultivated as winter intermediate crops. Ceriani et al. (2024) achieved a 75% reduction in greenhouse gas emissions using camelina and castor bean in a double-cropping system in northern Italy. The reduction increased to 81% when biogas produced from the residual oilseed meal was incorporated

into the system. Disruption of the TT8 gene using CRISPR technology increased oil content in camelina by more than 20% (Cai et al., 2024). Stamenković et al. (2023) highlighted the suitability of camelina oil for biodiesel production because of its high net energy ratio and low production costs. Russo et al. (2025) and Zanetti et al. (2021) reported that these crops can be cultivated on marginal lands with low input requirements while providing ecological benefits.

8.2. Safflower and castor bean on marginal lands

Russo et al. (2025) reported that these crops are suitable for marginal lands because of their low input requirements and tolerance to environmental stresses. They also have the potential to achieve greenhouse gas emission reductions that satisfy the thresholds established under the Renewable Energy Directive II (RED II). Research on safflower in Türkiye further supports its potential as a source of both stalk biomass and oil (Koç and Hamzaoğlu, 2025).

8.3. Hemp and other potential crops

Hemp seed oil has yielded biodiesel that complies with the relevant standards (KTAE, 2024). Lignocellulosic residues from hemp can also be utilized for second-generation bioethanol and biogas production. Energy crops such as switchgrass and miscanthus, together with agricultural residues, are important sources of lignocellulosic biomass for biofuel production (Sims et al., 2010).

9. Production technologies and process optimization

9.1. Transesterification and catalysts

Transesterification is the most widely used method for biodiesel production. Homogeneous catalysts, such as NaOH and KOH, provide high yields but can create challenges related to wastewater generation and catalyst recovery. Heterogeneous catalysts, including CaO and metal oxides, offer advantages in

catalyst recovery, whereas enzymes enable processing at lower temperatures and produce high-purity products (Afolabi et al., 2026). Ultrasound-assisted processes and supercritical methanol applications can shorten reaction times and improve yields (Oliva-Rodríguez et al., 2025). Process optimization is particularly important when using oils with high viscosity, such as castor bean and safflower oils.

9.2. Integrated biorefinery approaches

Utilizing oilseed meal and other residues for biogas or bioethanol production improves both economic and environmental performance. Ceriani et al. (2024) increased greenhouse gas emission reductions to 81% by incorporating biogas production from oilseed meal into a double-cropping system. Oliva-Rodríguez et al. (2025) produced bioethanol from castor bean meal through enzymatic hydrolysis and fermentation. These approaches strengthen the biorefinery concept by improving feedstock utilization efficiency.

10. Sustainability, life cycle assessment (LCA), and challenges

10.1. Life cycle assessments

LCA studies demonstrate that feedstock selection is a key determinant of carbon intensity. Crops cultivated on marginal lands and waste oils generally offer lower-emission profiles (Russo et al., 2025; Cherubini and Strømman, 2011). First-generation biofuel crops are often associated with relatively high emissions during the agricultural production stage. The rapid growth in advanced biofuel consumption in the European Union highlights the influence of policy support (Energy, 2023).

10.2. The food-versus-fuel dilemma and land use

Indirect land-use change (ILUC) risks can be reduced through second-generation biofuel production and intermediate

cropping systems (Change, 2008; Fargione et al., 2008). Crops cultivated on marginal lands can also provide ecological benefits, including increased soil organic matter and erosion control (Russo et al., 2025).

10.3. Policy dimensions and future prospects

Policies such as the European Union's Renewable Energy Directive II and III (RED II/III) and the United States' Renewable Fuel Standard (RFS) promote advanced biofuels. In Türkiye, incentives for domestic feedstocks and programs supporting the use of marginal lands could help realize the sector's potential. In the future, metabolic engineering, intermediate cropping systems, and the integration of waste oils are expected to contribute to a more sustainable lipid supply.

11. Conclusion

Biofuel production from industrial crops initially developed on a global scale through first-generation systems based on soybean, rapeseed, and palm oils. Today, the sector is shifting toward second-generation and advanced approaches that incorporate waste oils, crops cultivated on marginal lands (Camelina sativa, Brassica carinata, safflower, and castor bean), and metabolic engineering strategies involving oilcane and energycane. While the consumption of advanced biofuels and the use of soybean oil are increasing in the European Union and the United States, sunflower remains the dominant oilseed crop in Türkiye, and research on safflower and hemp highlights the country's domestic biofuel potential.

Achieving a balance between food security, carbon emissions, and economic feasibility requires an integrated assessment of crop selection, cultivation systems, processing technologies, and life cycle assessment (LCA). Under Türkiye's agricultural conditions, developing the use of marginal lands and intermediate cropping systems offers significant opportunities to

strengthen both energy security and agricultural diversification. Future research should focus on developing cultivars adapted to local ecological conditions, integrating biorefinery systems, and strengthening policy support. These efforts will enhance the role of industrial crops throughout the biofuel production chain.

References

Afolabi, O. A., Ndou, N., & Afolabi, F. O. (2026). Perspective Chapter: Technological Innovations in Biodiesel Production for Economic Viability and Market Integration.

Bera, T., Inglett, K. S., & Wilkie, A. C. (2020). Biofuel: Concepts and Considerations: SL475/SS688, 9/2020. *EDIS*, *2020*(5).

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, *14*(2), 557-577.

Cai, Y., Liang, Y., Shi, H., Cui, J., Prakash, S., Zhang, J., ... & Shanklin, J. (2024). Creating yellow seed Camelina sativa with enhanced oil accumulation by CRISPR-mediated disruption of Transparent Testa 8. *Plant biotechnology journal*, *22*(10), 2773-2784.

Cao, V. D., Kannan, B., Luo, G., Liu, H., Shanklin, J., & Altpeter, F. (2023). Triacylglycerol, total fatty acid, and biomass accumulation of metabolically engineered energycane grown under field conditions confirms its potential as feedstock for drop-in fuel production. *GCB Bioenergy*, *15*(12), 1450-1464.

Ceriani, M., D'Imporzano, G., De Nisi, P., Ghidoli, M., Rapone, I., Pilu, S., & Adani, F. (2024). Improving biodiesel sustainability by double-cropping oilseed and oil-less seed cake recovery: A field approach in northern Italy. *Energy Conversion and Management: X*, *24*, 100821.

Change, L. U. (2008). Use of US croplands for biofuels increases. *science*, *1151861*(1238), 319.

Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource technology*, *102*(2), 437-451.

Demirbas, A. (2008). Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy policy*, *36*(2), 834-842.

El Marji, L., Sharara, M., El Chakik, D., Nakad, M., Assaf, J. C., & Estephane, J. (2026). A Comparative Review of Biomass Conversion to Biodiesel with a Focus on Sunflower Oil: Production Pathways, Sustainability, and Challenges. *Processes*, *14*(3), 441.

Energy Institute. (2025). *Big in biofuels: a Brazil success story*. New Energy World. https://knowledge.energyinst.org/new-energy-world/article?id=138477

Energy, C. (2023). Advanced Biofuels in the European Union.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, *319*(5867), 1235-1238.

Kannan, B., Liu, H., Shanklin, J., & Altpeter, F. (2022). Towards oilcane: preliminary field evaluation of metabolically engineered sugarcane with hyper-accumulation of triacylglycerol in vegetative tissues. *Molecular Breeding*, *42*(10), 64.

Karabaş, H. (2013). Ülkemiz Islahçı Çeşitlerinden Remzibey-05 Aspir (Carthamus tinctorius L.) Tohumlarından Üretilen Biyodizelin Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *27*(1), 9-17.

Khan, E., Ozaltin, K., Spagnuolo, D., Bernal-Ballen, A., Piskunov, M. V., & Di Martino, A. (2023). Biodiesel from rapeseed and sunflower oil: effect of the transesterification conditions and oxidation stability. *Energies*, *16*(2), 657.

Koç, H., & Hamzaoğlu, S. (2025). Aspir Genotiplerinin Sap Verimi ve Samanlarının Bazı Yem Değerlerinin Belirlenmesi. *Tarim ve Doga Dergisi*, *28*(1), 256.

KTAE, (2024). *Kenevir tarımı ve kenevirden biyodizel üretimi çalışmaları*. Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM). www.tarimorman.gov.tr

Luo, G., Cao, V. D., Kannan, B., Liu, H., Shanklin, J., & Altpeter, F. (2022). Metabolic engineering of energycane to hyperaccumulate lipids in vegetative biomass. *BMC biotechnology*, *22*(1), 24.

Maitra, S., Cheng, M. H., Liu, H., Cao, V. D., Kannan, B., Long, S. P., ... & Singh, V. (2024). Sustainable co-production of plant lipids and cellulosic sugars from transgenic energycane at an industrially relevant scale: A proof of concept for alternative feedstocks. *Chemical Engineering Journal*, *487*, 150450.

Mondal, S., Gurumoorthy, A. V., & Moorthy, I. G. (2025). Sustainable production of biodiesel from non-edible kernel-derived feedstocks: A comprehensive review of production processes, properties, and optimization. *Results in Chemistry*, 102967.

Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *14*(2), 578-597.

Nikolić, B. D., Marković, S. D., Petrović, N. S., Marinković, D. Z., & Jovanović, V. D. (2025). BIODIESEL AND FEEDSTOCKS POSSIBILITIES AND CHARACTERISTICS: A Review. *Thermal Science*, *29*(5A), 3477.

Oliva-Rodríguez, A. G., Salinas De León, F., Morales-Martínez, T. K., Rodríguez-De la Garza, J. A., Medina-Morales, M. A., Cruz-Requena, M., ... & Ríos-González, L. J. (2025). Coproduction of Biodiesel and Bioethanol from Ricinus communis Seed Through an Integrated Process. *Processes*, *13*(9), 2877.

Parajuli, S., Kannan, B., Karan, R., Sanahuja, G., Liu, H., Garcia-Ruiz, E., ... & Altpeter, F. (2020). Towards oilcane: Engineering hyperaccumulation of triacylglycerol into sugarcane stems. *Gcb Bioenergy*, *12*(7), 476-490.

Russo, C., Cirillo, V., Pollaro, N., Terribile, F., Chiodini, A., & Maggio, A. (2025). The global energy challenge: second-generation feedstocks on marginal lands for a sustainable biofuel production. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, *12*(1), 10.

Sims, R. E., Mabee, W., Saddler, J. N., & Taylor, M. (2010). An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource technology*, *101*(6), 1570-1580.

Stamenković, O. S., Gautam, K., Singla-Pareek, S. L., Dhankher, O. P., Djalović, I. G., Kostić, M. D., ... & Veljković, V. B. (2023). Biodiesel production from camelina oil: Present status and future perspectives. *Food and Energy Security*, *12*(1), e340.

Stillwater Publications, (2025). *Lipid Feedstock Availability for Renewable Fuels: Current Supply, Emerging Sources &*

Market Outlook. Stillwater Publications. https://stillwaterpublications.com/lipid-feedstocks-101/

Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanović Jeromela, A., Grahovac, N., Rajković, D., Kiprovski, B., & Monti, A. (2021). Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review: camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *41*(1), 2.

BÖLÜM 3
ANAEROBİK ÇÜRÜTME SİSTEMLERİNDE BİYOKÖMÜRÜN BİYOGAZ ÜRETİMİNE ETKİLERİ

Alperay ALTIKAT[1]

Giriş

Anaerobik çürütme (AD), organik atıkları oksijensiz koşullarda biyogaza dönüştürerek atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimini birleştirir. Hayvan gübresi, tarımsal artıklar, gıda atıkları ve arıtma çamurları başlıca substratlardır. Sürecin uygulanabilirliğini ise substratın ayrışabilirliği, organik yük, amonyak ve uçucu yağ asidi birikimi sınırlar. Biyokömür, bu kısıtları hafifletmek amacıyla kullanılan karbonca zengin bir piroliz ürünüdür; adsorpsiyon, mikrobiyal tutunma ve elektron transferi üzerinden reaktör performansını etkileyebilir (Kumar et al., 2021).

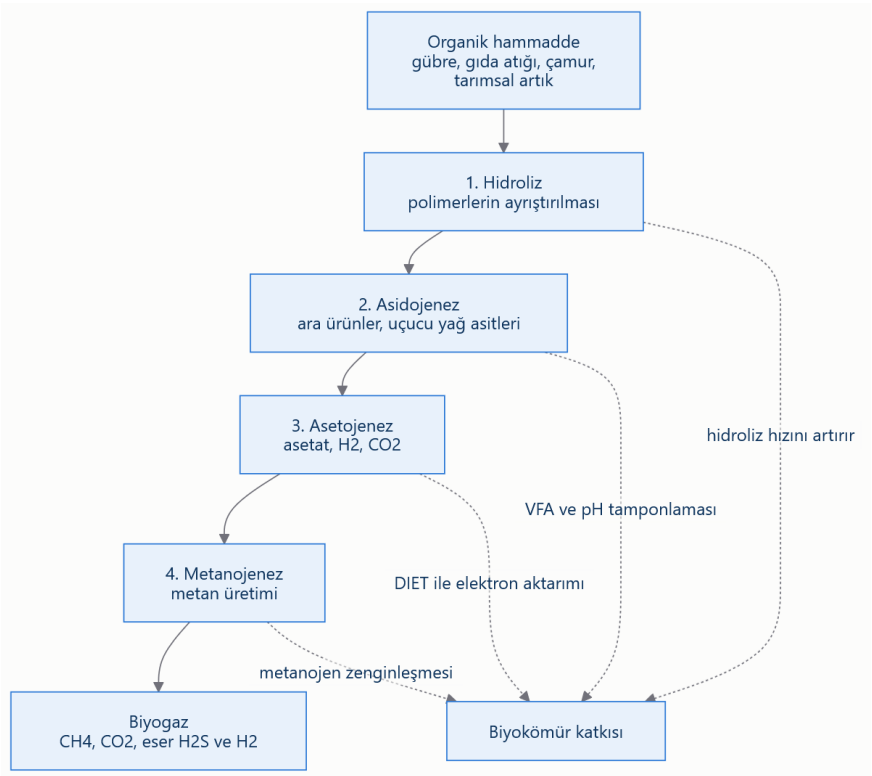
Biyokömürün katkısı her koşulda aynı değildir. Yirmi yedi yayın ve 156 eşleştirilmiş ölçümü kapsayan meta-analizde biyometan üretimi için 5,7 ± 1,04 Hedges d etki büyüklüğü bildirilmiş, ancak bazı çalışmalarda üretim azalmıştır. Hammadde, piroliz sıcaklığı ve doz, yanıtın belirleyicileri arasındadır (Xiao et al., 2021). Bu bölüm; temel süreçleri, performans bulgularını, etki mekanizmalarını ve ekonomik sınırlamaları altı şekil ve beş çizelgeyle birlikte değerlendirir. Amaç, laboratuvar sonuçlarını genel bir verim garantisine dönüştürmeden uygulama koşullarını tartışmaktır.

1[Arş. Gör/ Iğdır Üniversitesi / Bahçe Bitkileri Bölümü / ORCID: 0009-0005-8270-1728]

Anaerobik Çürütmenin Temelleri ve Biyogaz Oluşumu

AD; hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez aşamalarından oluşur. Karmaşık organik maddeler önce daha küçük bileşiklere, ardından metan oluşumunda kullanılan ara ürünlere dönüşür. Asetoklastik ve hidrojenotrofik metanojenler farklı dönüşüm yollarında görev alır. İki fazlı tasarımlarda bu mikrobiyal süreçlerin işletme koşulları ayrı ayrı düzenlenebilir (Masoud et al., 2025). Şekil 1, biyokömürün yalnızca metanojenezde değil, hidroliz ve ara ürün dönüşümlerinde de etkili olabilecek müdahale noktalarını gösterir.

Şekil 1. Anaerobik çürütmenin dört aşamalı biyokimyasal dönüşümü ve biyokömürün müdahale ettiği süreç noktaları



Kaynak: Masoud et al. (2025) temel alınarak düzenlenmiştir.

Biyogazın enerji değeri esas olarak metan içeriğine bağlıdır; bu nedenle performans değerlendirmesinde toplam biyogaz hacmi, metan oranı ve özgül metan verimi birbirinden ayrılmalıdır. Uçucu katı veya substrat kütlesi başına verilen sonuçlar aynı hesaplama temeline dönüştürülmeden karşılaştırılmamalıdır. H_2S gibi safsızlıklar gazın kullanımını ve arıtma gereksinimini etkiler. Biyokömür, reaktör içinde süreç desteği sağlarken reaktör dışında gaz temizleme malzemesi olarak da kullanılabilir (Osman et al., 2022).

Amonyak toksisitesi ve uçucu yağ asidi (VFA) birikimi önemli işletme kısıtlarıdır. VFA birikimi pH düşüşüne, amonyak ise metanojenik etkinliğin baskılanmasına yol açabilir. Etki, yalnızca inhibitör derişimine değil, substrata ve mikrobiyal uyuma da bağlıdır. Bu nedenle biyokömür uygulaması, organik yük ve reaktör kararlılığıyla birlikte değerlendirilmelidir; katkı maddesi kullanımı uygun işletmenin yerini alamaz (Kumar et al., 2021).

Biyokömür: Üretimi ve Fizikokimyasal Özellikleri

Biyokömürün özellikleri hammadde ve piroliz koşullarıyla şekillenir. Sıcaklık, bekleme süresi ve ısıtma koşulları; gözeneklilik, elektriksel iletkenlik, yüzey kimyası ve mineral içeriğini birlikte değiştirir. Yüksek sıcaklık bazı biyokömürlerde yüzey alanını ve karbonlaşmayı artırırken oksijenli fonksiyonel grupları azaltabilir. Bu nedenle en yüksek yüzey alanına sahip ürünün her substratta en yüksek metan verimini sağlayacağı varsayılamaz (Bardi et al., 2023).

Yüzey alanı ve gözenekler adsorpsiyon ile mikrobiyal tutunmayı; iletkenlik elektron aktarımını; mineral bileşimi ve yüzey grupları ise tamponlama ve iyon etkileşimlerini etkiler. Gübre kaynaklı biyokömürde yüzey alanının 350 °C'de 0,92 m^2/g iken 700 °C'de 187 m^2/g'a çıkması, üretim koşullarının etkisine örnektir

(Osman et al., 2022). Ancak bu özellikler bağımsız değildir ve birinin iyileşmesi diğer işlevlerin aynı ölçüde geliştiği anlamına gelmez.

Katyon değişim kapasitesi, hammadde seçiminin işlevsel sonuçlarından biridir. Pirinç kavuzu, Hindistan cevizi ve odun biyokömürlerinde sırasıyla 43,28 ± 1,49; 31,17 ± 0,35 ve 21,47 ± 0,65 meq/100 g değerleri bildirilmiştir (Kumar et al., 2021). Bu özellik amonyum ve diğer katyonların tutulması açısından anlamlıdır; ancak yüksek kapasite, reaktörde mutlaka aynı oranda inhibisyon azalması sağlayacağı biçiminde yorumlanmamalıdır. Gerçek atıktaki diğer çözünmüş bileşenler ve işletme koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Hammadde seçimi, ürünün karbon ve kül içeriğini, besin elementi katkısını ve üretim maliyetini belirler. Odunsu biyokütle, gübre ve çamur kaynaklı ürünler aynı katkı maddesi gibi değerlendirilmemelidir. Çizelge 1, piroliz sıcaklığının özellikler üzerindeki eğilimlerini ve AD bakımından olası anlamlarını bir araya getirir. Bu ilişkiler, biyokömür seçiminin yalnızca üretim sıcaklığına indirgenemeyeceğini gösterir (Chiappero et al., 2020).

Çizelge 1. Piroliz sıcaklığının biyokömürün fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkisi ve AD performansı ile ilişkisi.

Özellik	**Piroliz sıcaklığı arttıkça eğilim**	**AD açısından anlamı**
Özgül yüzey alanı	Artar (gübre biyokömüründe 350 °C'de 0,92 m^2/g → 700 °C'de 187 m^2/g) (Osman et al., 2022)	Adsorpsiyon ve mikrobiyal immobilizasyon kapasitesi yükselir
Porozite, gözenek yapısı, elektriksel iletkenlik	Artar (Bardi et al., 2023)	Elektron transferi ve DIET potansiyeli güçlenir

Özellik	Piroliz sıcaklığı arttıkça eğilim	AD açısından anlamı
Karbon kütle fraksiyonu, mikrogözenek hacmi, kül, sabit karbon, karbon stabilitesi	Artar (Chiappero et al., 2020)	Malzeme kararlılığı ve karbon tutma süresi uzar
Oksijenli fonksiyonel gruplar, alifatik karbon, N, O, H derişimi	Azalır (Chiappero et al., 2020)	Yüzey kimyası ve iyon değişimi kapasitesi değişir
Fonksiyonel grup zenginliği ile metan artışı arasındaki korelasyon	Anlamlı ilişki yok ($R^2 <$ 0,1) (Bardi et al., 2023)	Metan artışı tek başına yüzey kimyasıyla açıklanamaz
Mikrobiyal topluluk gelişimi	Piroliz sıcaklığı ile pozitif ilişkili (metan artışıyla R^2 = 0,33) (Bardi et al., 2023)	Biochar etkisinin önemli bir bölümünün mikrobiyal topluluk ve DIET üzerinden gerçekleştiği bildirilmektedir (Valentin et al., 2023)

Kaynaklar: (Osman et al., 2022); (Bardi et al., 2023); (Chiappero et al., 2020); (Valentin et al., 2023)

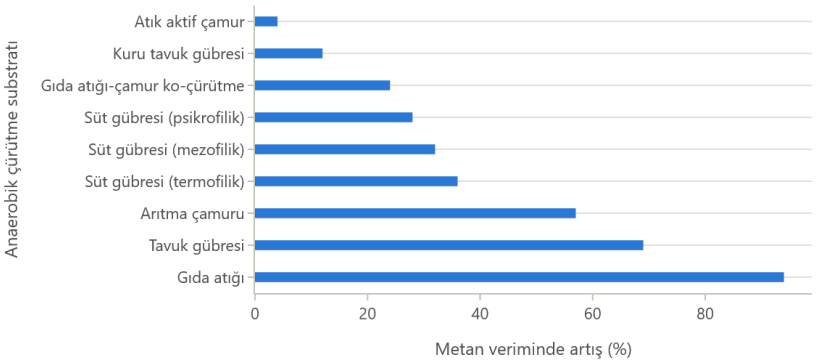
Çizelge 1'deki ilişkiler doğrudan nedensellik kanıtı olarak yorumlanmamalıdır. Fonksiyonel grup zenginliğiyle metan artışı arasında zayıf ilişki ($R^2 < 0,1$), mikrobiyal topluluk gelişimiyle ise orta düzeyde ilişki ($R^2 = 0,33$) bildirilmiştir (Bardi et al., 2023). Dolayısıyla karakterizasyon verileri, reaktör deneyleri ve mikrobiyal bulgular birlikte ele alınmalıdır.

Biyokömürün Biyogaz Üretimine Kantitatif Etkileri

Derlemelerde metan verimi artışları %4–94 arasında değişmektedir (Osman et al., 2023). Şekil 2'deki karşılaştırma, substrat ve işletme koşullarının önemini ortaya koyar: fosfat yüklü

biyokömürle gıda atığında %94'e varan artış bildirilirken atık aktif çamurda çamur biyokömürünün katkısı %4 düzeyinde kalmıştır. Farklı koşullarda elde edilmiş bu oranlar, biyokömür türlerinin doğrudan başarı sıralaması olarak değerlendirilmemelidir.

Şekil 2. Farklı anaerobik çürütme substratlarında biyokömür ilavesinin metan veriminde sağladığı artış oranları



Kaynak: Osman et al. (2023) kaynağından derlenmiştir.

Substrat bileşimi katkının yönünü değiştirebilir. Karbonhidratça, proteince ve lipidçe zengin substratların karşılaştırıldığı çalışmada, arıtma çamuru biyokömürü karbonhidratlı substratın gecikme fazını %48,6 kısaltmış ve kümülatif metan verimini 4,74 kat artırmıştır. Lipidli substratta üretim hızı yükselirken proteinli substratta etki önemsiz kalmıştır (Xu et al., 2020). Bu ayrım, yalnızca toplam organik madde miktarının değil, bileşimin de deney tasarımında kontrol edilmesi gerektiğini gösterir. Sonuçlar, bir substratta başarılı olan biyokömürün diğerinde aynı yanıtı vermeyebileceğine ilişkin doğrudan örnektir.

Üretim Kinetiği

Nihai metan verimi kadar üretim hızı ve gecikme fazı da önemlidir. Biyokömür ilavesiyle CH_4 ve H_2 üretimindeki gecikme fazlarının sırasıyla %41–45 ve %21,4–35,7 kısaldığı; manyetik biyokömürle metanojenez gecikmesinin 0,9–1,83 gün azaldığı bildirilmiştir (Kumar et al., 2021). Bu sonuçlar işletmeye alma süresinin kısalabileceğini düşündürür; ancak farklı başlangıç koşullarının karşılaştırılabilirliği gözetilmelidir.

Doz Optimizasyonu

Doz–yanıt ilişkisi doğrusal değildir; yetersiz doz etkisiz kalabilirken aşırı ilave inhibisyona yol açabilir (Zhang et al., 2019). Çizelge 2, substrat, biyokömür ve doz farklılıklarını koruyarak performans sonuçlarını sunar. Derlemelerde sık kullanılan 10 g/L değeri evrensel optimum değildir (Osman et al., 2022). Bu nedenle ön denemeler, biyokömürsüz kontrol ve substrata uygun doz aralığıyla yürütülmelidir; metan verimi yanında VFA, pH ve amonyak da izlenmelidir.

Arıtma çamuru ve gıda atığının birlikte çürütülmesinde, 30 g/L biyokömür metan konsantrasyonunu yalnızca %1,6–2,8 artırırken 40 ve 70 g/L düzeylerinde %10,6–37,9 artış bildirilmiştir (Lăcureanu & Cocârță, 2025). Bu çalışmada ölçülen metan konsantrasyonu, özgül metan verimiyle aynı gösterge değildir; sonuç yalnızca yüksek dozun daha fazla gaz ürettiği biçiminde okunmamalıdır. Doz artırımı, kazanımın büyüklüğü kadar ilave katı yükü ve malzeme maliyeti açısından da değerlendirilmelidir.

Üretim sıcaklığı ile dozun etkisi de birlikte incelenmelidir. Meyve atığı deneylerinde 350 °C biyokömürüyle 285,7 mL CH_4/g maksimum metan verimi bildirilmiş ve bu sonuç 550 °C ürününden yüksek bulunmuştur (Ambaye et al., 2020). Bu bulgu, yüksek piroliz sıcaklığının gözenek ve iletkenlik avantajlarının her durumda daha

yüksek reaktör verimine dönüşmediğini gösterir. Aynı deneysel karşılaştırmada inokulum/substrat oranının değişmesi de yanıtı etkilemiştir. Dolayısıyla doz optimizasyonunda yalnızca biyokömür miktarını değiştiren tek değişkenli denemeler, diğer işletme parametreleri kontrol edildiğinde yorumlanabilir.

Çizelge 2. Farklı substratlar için biyokömür hammaddesi, dozu ve metan verimi üzerindeki etkiler.

Substrat	**Biyokömür hammaddesi / üretim koşulu**	**Uygulanan doz**	**Metan verimi üzerindeki etki**
Tavuk gübresi	Meyve odunu, toplam katının %5'i	%5	+%69 (Osman et al., 2023)
Kuru tavuk gübresi	Odun, toplam katının %5'i	%5	+%12 (Osman et al., 2023)
Arıtma çamuru	Mısır sapı	28 g/L	+%57 (Osman et al., 2023)
Gıda atığı	Fosfat yüklü biyokömür	10 g/L	+%94 (Osman et al., 2023)
Atık aktif çamur	Çamur biyokömürü	10 g/L	+%4 (Osman et al., 2023)
Gıda atığı–çamur ko-çürütme	Buğday sapı	10 g/L	+%24 (Osman et al., 2023)
Süt sığırı gübresi	Gübre biyokömürü	10 g/L	+%28 / +%32 / +%36 (psikrofilik / mezofilik / termofilik) (Osman et al., 2023)
Süt sığırı gübresi	Gübre biyokömürü	10 g/L	Gecikme fazının kısalması, +%35,71 (Osman et al., 2022)

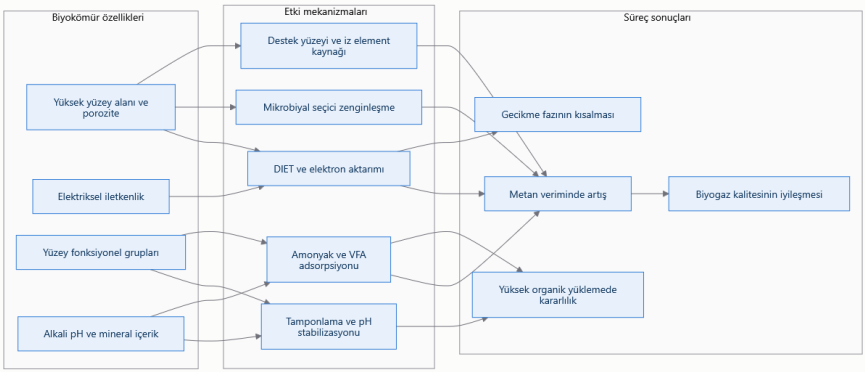
Substrat	Biyokömür hammaddesi / üretim koşulu	Uygulanan doz	Metan verimi üzerindeki etki
Meyve atığı	Arıtma çamuru biyokömürü, 350 °C	ISR 2 / 1,5 / 1	+%13 / +%20 / +%27 (Ambaye et al., 2020)
Meyve atığı	Arıtma çamuru biyokömürü, 550 °C	ISR 2 / 1,5 / 1	+%12 / +%18 / +%22 (Ambaye et al., 2020)
Karma atık su çamuru	Biyokömür	10 g/L	Biyogaz 188 → 244 NmL/gün; metan %68 → %69 (Chiappero et al., 2021)
Gıda atığı fermentatı	Buğday kepeği peleti, 800 °C	25 g/L	VFA parçalanma hızında artış, gecikme fazında azalma (Chiappero et al., 2020)

Kaynaklar: (Osman et al., 2023); (Osman et al., 2022); (Ambaye et al., 2020); (Chiappero et al., 2021); (Chiappero et al., 2020)

Biyokömürün Etki Mekanizmaları

Biyokömürün etkisi; iletken bir bağlantı yüzeyi oluşturması, mikroorganizmaları tutması, tamponlamaya katkı sağlaması ve inhibitörleri adsorplaması üzerinden açıklanır. Bu süreçler aynı reaktörde birlikte gerçekleşebilir. Şekil 3, malzeme özelliklerinden süreç performansına uzanan ilişkileri özetler. Bir mekanizmanın varlığını yalnızca metan artışından çıkarmak yeterli değildir; kimyasal ve mikrobiyal ölçümlerle desteklenmesi gerekir (Hoang et al., 2022).

Şekil 3. Biyokömürün fizikokimyasal özellikleri, etki mekanizmaları ve anaerobik çürütme performansı arasındaki ilişki ağı



Kaynak: Hoang et al. (2022) ve Osman et al. (2022) temel alınarak oluşturulmuştur.

Doğrudan Türler Arası Elektron Transferi

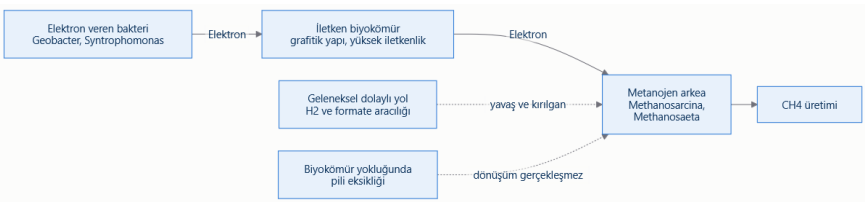
Doğrudan türler arası elektron transferinde (DIET), elektron veren ve alan mikroorganizmalar arasındaki alışveriş iletken malzemelerle desteklenebilir. Biyokömüre tutunan Geobacter metallireducens ve Methanosarcina barkeri hücrelerinin doğrudan agregat oluşturmaması, elektronların biyokömür üzerinden aktarılabileceğine ilişkin deneysel kanıt sağlamıştır (Chen et al., 2014). Şekil 4, bu yaklaşımı geleneksel dolaylı elektron transferiyle karşılaştırır. Bununla birlikte biyokömürün iletkenliği ve mikrobiyal eşleşme, mekanizmanın işlerliğini sınırlar.

İletken malzemenin işlevini değerlendiren ko-kültür deneylerinde, pilA-eksik Geobacter metallireducens suşları ile Methanosarcina barkeri'nin iletken malzeme yokluğunda etanolü metana dönüştüremediği; granüler aktif karbon, karbon bezi veya biyokömür varlığında ise dönüşümün gerçekleştiği bildirilmiştir (Martins et al., 2018). Bu kanıt, bazı hücresel bağlantı eksikliklerinin iletken bir yüzeyle telafi edilebildiğini destekler. Bununla birlikte

kontrollü ko-kültür sonucu, karmaşık atıkla çalışan bütün reaktörlerde aynı mekanizmanın baskın olduğunu göstermez.

Daha yeni bir çalışmada, 550 °C'de üretilen fındık kabuğu biyokömürü kontrol grubuna göre metan üretimini %59 artırmıştır. Grafitizasyon ve metagenomik bulgular, iletkenlik ile DIET'le ilişkili takson ve genlerin zenginleşmesini birlikte göstermiştir (Yang et al., 2025). Bu bulgu, biyokömürün yalnızca pasif adsorban olmadığını destekler; ancak farklı hammaddeler için aynı performansın beklenmesini haklı çıkarmaz.

Şekil 4. Biyokömür aracılı doğrudan türler arası elektron transferi mekanizması ve geleneksel dolaylı elektron transferinden farkı



Kaynak: Chen et al. (2014) ve Martins et al. (2018).

Tamponlama ve İnhibitör Kontrolü

Biyokömürün tamponlama etkisi, mineral bileşenler ve yüzey fonksiyonel gruplarıyla ilişkilidir. VFA oluşumuna bağlı asitlenmenin hafifletilmesi metanojenler için uygun koşulların sürdürülmesine katkı sağlayabilir (Osman et al., 2022). Buna karşın biyokömürlü bir reaktörde pH'ın 5,0'dan 3,0'a düştüğü de bildirilmiştir (Kumar et al., 2021). Bu nedenle başlangıç pH'ı veya biyokömürün alkali karakteri, uzun süreli kararlılığın tek başına göstergesi değildir.

Amonyumun adsorpsiyonu ve mikrobiyal tutunma, amonyak inhibisyonunun hafiflemesine katkı sağlayabilir. Arıtma çamuru deneylerinde toplam amonyak azotu biyokömürlü reaktörlerde 3,43–3,76 g/L, kontrolde 4,28 g/L bulunmuştur (Zhang et al., 2019).

Sürekli işletilen sistemlerde VFA kontrolü de önemlidir: biyokömür takviyeli reaktörlerde dalgalanmaların 1500 mg HAc/L altında tutulabildiği, buna rağmen yüksek amonyak koşullarında ciddi metan kaybı oluşabildiği bildirilmiştir (Yan et al., 2022). Ara ürün kararlılığı ile enerji üretimi birlikte değerlendirilmelidir.

Sürekli işletmeye yakın kanıtlar, kısa kesikli testlerin tamamlayıcısıdır. Yarı sürekli bir çalışmada 3 L hacimli çürütücü, 37 °C'de 100 gün süreyle 10 g/L biyokömür ilavesiyle işletilmiştir. Biyogaz üretimi 188'den 244 NmL/gün'e çıkarken metan oranı %68'den %69'a yükselmiştir (Chiappero et al., 2021). Gaz hacmindeki artışın metan yüzdesindeki artıştan farklı büyüklükte olması, bu iki göstergenin ayrı raporlanması gerektiğini açıkça gösterir. İşletme süresi ve reaktör ölçeği de sonuçla birlikte belirtilmelidir.

Mikrobiyal Topluluk

Biyokömür, mikroorganizmaların tutunabildiği bir yüzey sağlayarak topluluk bileşimini seçici biçimde etkiler. Metanobacterium, Methanosaeta ve Methanosarcina'nın zenginleşmesi bazı sistemlerde gösterilmiştir (Valentin et al., 2023). Bununla birlikte takson bolluğundaki artış tek başına DIET'in kanıtı değildir; elektron aktarımı, enzim etkinliği ve reaktör çıktılarıyla birlikte yorumlanmalıdır. Seçici zenginleşmenin substrata ve biyokömürün yüzey özelliklerine bağlı olması, farklı çalışmalardaki sonuçların değişmesini açıklayabilir.

Kirleticilerin Tutulması

İnhibitör giderimi, antibiyotik baskısı altındaki sistemlerde de önem taşır. Sefazolin maruziyetinde metan veriminin %28,14'e kadar düştüğü; biyokömür ilavesinin belirli organik yüklerde dirençli bakteri bolluğunu %1'in altına indirerek inhibisyonu hafiflettiği bildirilmiştir (You et al., 2025). Fonksiyonel

biyokömürlerin adsorpsiyon ve mikrobiyal yönlendirme katkıları umut vericidir; ancak kirleticinin tutulması ile kalıcı giderimi aynı kabul edilmemeli, çürütme artığının sonraki kullanımı da değerlendirilmelidir (Chen et al., 2024). Kuru AD üzerine bir çalışmada 1,25 g/L biyokömürün antibiyotik direnç genleriyle ilişkili riskin azaltılmasında uygun sonuç verdiği bildirilmiştir (Wang et al., 2026). Bu doz, metan üretimini en çok artıran dozla aynı olmak zorunda değildir. Enerji kazanımı ve mikrobiyolojik risk azaltımının farklı hedefler olduğu, çok ölçütlü optimizasyon gerektirdiği dikkate alınmalıdır.

Proses Konfigürasyonları ve Uygulama Stratejileri

İki fazlı AD, asit oluşturan ve metan üreten mikroorganizmaların koşullarını ayrı düzenlemeyi amaçlar. Böylece hidroliz ve metanojenez arasındaki işletme uyuşmazlıkları azaltılabilir (Masoud et al., 2025). Çizelge 3'teki karşılaştırmalar, faz ayırmanın etkisiyle biyokömür katkısının etkisini ayırt etmek için önemlidir. Çiftlik hammaddelerinde biyokömürlü iki fazlı sistemde 237 L CH_4/kg uçucu katı verimi ve biyokömürsüz ikinci faza göre %7 artış bildirilmiştir (Xue et al., 2023). Bu sonuç belirli yükleme ve doz koşullarına aittir.

Çizelge 3. İki fazlı (iki kademeli) anaerobik çürütmede bildirilen performans sonuçları.

Sistem / substrat	**Temel bulgu**	**Kaynak**
Gıda atığı ve aktif çamur ko-çürütme (tek faz vs iki faz)	Biyogaz üretiminde %22 ve uçucu katı bozunmasında %9 artış; ortalama metan içeriği %61,2'den %70,1'e yükselmiştir	(Baldi et al., 2019)

Sistem / substrat	Temel bulgu	Kaynak
Çiftlik hammaddeleri (çim silajı, sığır sulu gübresi)	Kesikli: 230 → 275 L CH_4/kg UK; sürekli (4,0 g UK/L/gün): 212 L/kg UK (tek faz) ve 237 L/kg UK (iki faz, 10 g/L biyokömür); en yüksek enerji verimi 8,5 MJ/kg UK	(Xue et al., 2023)
İki kademeli süreç (genel değerlendirme)	Eşit KOİ dönüşümünde %10'a kadar yüksek enerji verimi; H_2 için 17,7 MJ/kg KOİ, CH_4 için 12,5 MJ/kg KOİ; 34 çalışmaya dayalı ortalama veriler: toplam KOİ'nin %72,5 ± 19,1'i H_2 ve CH_4 olarak geri kazanılmıştır	(Moscoviz et al., 2018)
İki fazlı sistemlerde faz ayrımı	Hidroliz/asidojenez ve asetojenez/metanojenez adımlarının ayrılması, yüksek organik yükleme hızlarında daha kararlı işletme ve daha yüksek metan üretkenliği sağlar	(Moscoviz et al., 2018)

Kaynaklar: (Baldi et al., 2019); (Xue et al., 2023); (Moscoviz et al., 2018)

Sıcaklık ve İşletme Koşulları

Sıcaklık rejimi, mikrobiyal etkinlik ve katkı maddesine yanıtı birlikte değiştirir. Süt sığırı gübresinde aynı biyokömürle psikrofilik, mezofilik ve termofilik işletmede sırasıyla %28, %32 ve %36 artış bildirilmiştir (Osman et al., 2023). Sonuçlar, sıcaklık yükseldikçe her substratta verimin artacağı biçiminde genellenmemelidir. Sıcaklık değişiminin enerji gereksinimi ve inhibitör dengesi üzerindeki etkileri de dikkate alınmalıdır.

Biyokömür Modifikasyonu

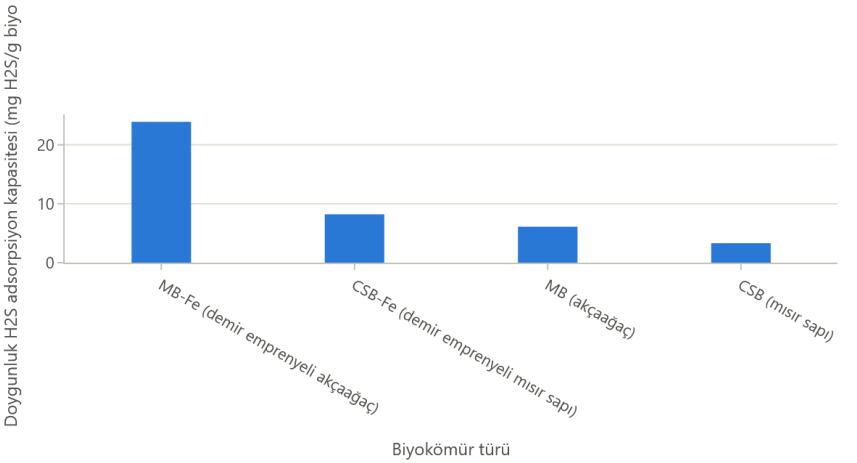
Metal veya mineral modifikasyonu, biyokömürün iletkenlik ve adsorpsiyon özelliklerini değiştirebilir. Ancak ek kimyasal kullanımının maliyeti, geri kazanım olanağı ve çürütme artığının güvenliği birlikte değerlendirilmelidir. Fonksiyonel biyokömürler için laboratuvar başarısının pilot ve sürekli sistemlere aktarılmasına ilişkin kanıtlar hâlen sınırlıdır (Chen et al., 2024). Bu nedenle modifikasyon, yalnızca en yüksek giderim veya metan artışı üzerinden seçilmemelidir.

Metal yükleme; pirolizden önce hammaddeye veya pirolizden sonra biyokömüre uygulanabilir. Fe, Mg, Al, Ca ve Mn katkıları yüzey yükünü, aktif bölgeleri ve elektron aktarımını değiştirebilir (Chen et al., 2024). Modifikasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasında yalnızca kullanılan metalin adı yeterli değildir; yükleme miktarı, üretim koşulları ve elde edilen malzemenin özellikleri belirtilmelidir. Manyetik davranış, geri kazanım bakımından yararlı olabilse de yeniden kullanım sırasında etkinliğin korunması deneysel olarak gösterilmelidir (Kumar et al., 2021).

Biyogaz Temizleme ve H_2S Giderimi

Biyokömür gaz temizlemede reaktör dışı adsorban olarak da kullanılabilir. Demir emprenyeli akçaağaç biyokömüründe 23,9 mg H_2S/g, modifiye edilmemiş üründe 6,1 mg H_2S/g doygunluk kapasitesi bildirilmiştir; mısır sapı biyokömüründe karşılık gelen değerler 8,2 ve 3,3 mg H_2S/g'dır (Choudhury & Lansing, 2020). Şekil 5, bu farkı görselleştirir. Performansın gaz bileşimi, nem ve temas koşullarına bağlı olması nedeniyle kapasite değerleri doğrudan reaktör içi metan artışına eşitlenmemelidir.

Şekil 5. Demir emprenyeli ve modifiye edilmemiş biyokömürlerin doygunluk H_2S adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması



Kaynak: Choudhury ve Lansing (2020) kaynağından alınmıştır.

Biyokömür ve hidrokömür aynı adsorban olarak ele alınmamalıdır. Biyokömürde yapısal özellikler, alkali karakter ve metal içeriği fiziksel ve kimyasal tutulmayı desteklerken, hidrokömürde korunmuş yüzey fonksiyonel gruplarına bağlı kimyasal etkileşimler öne çıkabilir (Vuppaladadiyam et al., 2024). Ticari uygulamaya geçişte hammadde, aktivasyon, sıcaklık ve nemin etkileri birlikte sınanmalıdır. Kullanılmış adsorbanın yönetimi ve olası yeniden kullanım gereksinimleri de toplam süreç tasarımının parçasıdır; yalnızca başlangıç adsorpsiyon kapasitesine dayalı seçim yeterli değildir.

Sınırlamalar ve Ölçek Büyütme

Olumlu sonuçlara karşın biyokömür etkisi tutarlı değildir. Meta-analizde hammadde, piroliz sıcaklığı ve doz önemli bulunurken bazı diğer özellikler için aynı ilişki gösterilememiştir (Xiao et al., 2021). Yüzey alanı, iletkenlik ve mikrobiyal topluluk eşzamanlı değiştiğinden gözlenen verim artışını tek özelliğe

bağlamak güçtür. Uzun süreli sürekli işletme, biyokömürün yaşlanması ve substrat heterojenliği, laboratuvar bulgularının ölçek büyütülmesinde ayrıca sınanmalıdır (Chen et al., 2024).

Ölçek büyütmede temel sorun, heterojen atık bileşimi ile kesikli testlerin kısa süreli yapısıdır. Sürekli işletmede besleme dalgalanmaları, biyokömür kaybı veya birikimi ve mikroorganizmaların uyumu birlikte etkili olabilir. Bu nedenle kontrol reaktörüyle karşılaştırılan uzun süreli kayıtlar, yalnızca son gaz hacminden daha açıklayıcıdır. Fonksiyonel biyokömürle işlenen çamurdan elde edilen çürütme artığının tarımsal kullanımı da ayrıca risk değerlendirmesi gerektirir (Chen et al., 2024). Reaktör performansındaki iyileşme, son ürünün çevresel açıdan güvenli olduğunu tek başına göstermez.

Mekanizma kanıtlarında bir diğer sınır, elektron aktarımının dolaylı göstergelerle değerlendirilmesidir. İletkenlik veya belirli mikroorganizmaların bolluğundaki artış, sistem düzeyindeki metan artışıyla ilişkili olabilir; ancak ilişkinin hangi hücresel yol üzerinden kurulduğunu kesinleştirmez. İletken malzemelerle yapılan ko-kültür deneyleri ile karma topluluklu gerçek atık reaktörleri farklı kanıt düzeyleri sunar (Martins et al., 2018). Bu ayrım, DIET açıklamasının hangi gözlemlere dayandığının açıkça belirtilmesini gerektirir.

Ekonomik Değerlendirme

Üretim maliyeti katkı maddesi seçiminde önemlidir. Derlenen çalışmalarda biyokömür için 0,2–0,5 USD/kg, granüler aktif karbon için 0,6–20 USD/kg aralıkları verilmiştir (Kumar et al., 2021). Çizelge 4'teki değerler farklı hammadde ve üretim koşullarına aittir; güncel piyasa fiyatı veya eşdeğer performans maliyeti olarak yorumlanmamalıdır. Ekonomik değerlendirme; üretim, taşıma, doz, enerji kazancı, yeniden kullanım ve artık yönetimini kapsamalıdır.

Birim malzeme fiyatının düşük olması tek başına yatırımın kârlı olduğunu göstermez.

Çizelge 4. Granüler aktif karbon ve biyokömür üretim maliyetlerinin karşılaştırması.

Katkı maddesi	**Hammadde**	**Üretim süreci / aktivasyon ajanı**	**Ülke**	**Üretim maliyeti (USD/kg) (Chiappero et al., 2020)**
GAC	Kanatlı altlığı kaynaklı karbon	Buhar	ABD	1,44
GAC	Pirinç kepeği	NaOH	Çin	3,58–3,77
GAC	Kırmızı meşe odunu	Buhar	ABD	0,62–1,27
GAC	Ticari	—	ABD	1,19–16,34
GAC	Meyve işleme atığı	Buhar	Malezya	1,67
GAC	Pirinç kepeği	CO_2	Brezilya	3,54
GAC	Asitle işlenmiş pirinç kepeği	CO_2	Brezilya	20,45
GAC	Odun	KOH	—	2,49
GAC	Odun kömürü	KOH	—	1,25
GAC	Linyit	KOH	—	2,18
GAC	Ticari	—	—	1,93
BC	Boş meyve salkımları	Yavaş piroliz	Malezya	0,533
BC	Saman	Yavaş piroliz (büyük ölçek)	Birleşik Krallık	0,203

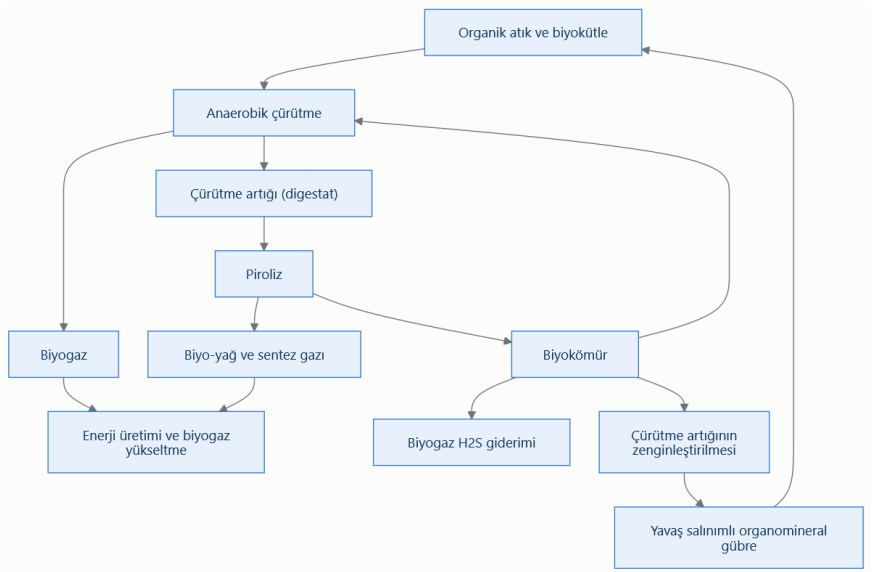
Kaynak: (Chiappero et al., 2020); genel aralıklar (Kumar et al., 2021).

Malzeme fiyatı karşılaştırması performans farklarını da hesaba katmalıdır. Granüler aktif karbonla yürütülen çalışmada, 25 g/L ilave maksimum metan üretim hızını %26 artırmış ve kümülatif üretimi yaklaşık iki katına çıkarmıştır (Kalantzis et al., 2023). Bu bulgu biyokömürün daha ucuz olmasının her koşulda daha iyi maliyet–fayda dengesi sağlayacağı anlamına gelmediğini gösterir. Farklı malzemeler, aynı substrat ve işletme koşullarında, ek metan üretimi başına toplam maliyet üzerinden karşılaştırılmalıdır.

Döngüsel Ekonomi ve Entegre Sistemler

AD ile pirolizin entegrasyonu, kolay ayrışan fraksiyonların biyogaza; ayrışması güç katıların biyokömür ve diğer piroliz ürünlerine dönüştürülmesini sağlayabilir. Biyokömür yeniden çürütücüye verilebilir veya gaz temizleme ve besin geri kazanımında kullanılabilir. Şekil 6, bu döngüsel akışı gösterir (Tayibi et al., 2021). Bununla birlikte kurutma ve piroliz enerjisi ile lojistik gereksinimler toplam kazancı etkiler. Entegrasyonun çevresel üstünlüğü, sistem sınırları açık bir madde–enerji dengesi ve yaşam döngüsü değerlendirmesiyle sınanmalıdır.

Şekil 6. Piroliz ve anaerobik çürütme süreçlerinin biyokömür aracılığıyla entegrasyonu ve döngüsel ekonomi akışı



Kaynak: Osman et al. (2023) ve Tayibi et al. (2021) temel alınarak oluşturulmuştur.

Çürütme artığının pirolizi ek ürün akışları yaratabilir. Derlemede, 700 °C'de pirolizle enerjinin %54–69'unun biyokömür ve biyo-yağa yöneldiği; yanıcı bileşen içeriği %65,5 olan sentez gazı elde edildiği bildirilmiştir (Dutta et al., 2021). Bu tür veriler sistem entegrasyonunu desteklese de enerji dağılımı ile net enerji kazancı aynı değildir. Islak çürütme artığının hazırlanması ve kurutulması için gereken enerji de hesaba katılmalıdır. Biyokömürün sıvı çürütme artığındaki amonyum, potasyum ve fosforu tutarak besince zenginleştirilmiş ürün oluşturması da değerlendirilebilir (Tayibi et al., 2021).

Sonuç ve Uygulama Önerileri

Biyokömürün başlıca katkıları DIET desteği, pH tamponlama, inhibitörlerin tutulması ve mikrobiyal yüzey

sağlamadır. Çizelge 5, bu mekanizmaları deneysel kanıtlarla özetler. Kanıtlar, biyokömürün uygun koşullarda metan üretimini ve kararlılığı geliştirebildiğini; katkının ise malzeme–substrat–işletme etkileşimine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle uygulama kararında en yüksek tekil artış yerine, tekrarlanabilir performans ve işletme kararlılığı esas alınmalıdır.

Çizelge 5. Biyokömürün anaerobik çürütme üzerindeki başlıca etki mekanizmaları ve deneysel kanıtların özeti.

Mekanizma	**Etki yolu**	**Temsili nicel kanıt**
DIET ve elektron transferi	İletken biyokömür üzerinden elektron göçü; pilus eksikliğinin telafisi	Fındık kabuğu biyokömürü (550 °C) kontrole kıyasla metan üretimini %59 artırmıştır (Yang et al., 2025); biyokömür yokluğunda pilA-eksik ko-kültürler etanolü metana dönüştürememiştir (Martins et al., 2018)
Tamponlama ve pH stabilizasyonu	Amin, karboksilik ve fenolik grupların hidronyum iyonu adsorpsiyonu; K, Na, Ca, Mg katkısı (Osman et al., 2022)	10 g/L biyokömür termofilik AD'de pH'ı 7,7'den 8,2'ye yükseltmiştir (Osman et al., 2022)
Amonyak inhibisyonunun hafifletilmesi	Fiziksel adsorpsiyon, gözenek dolgusu, iyon değişimi, amin/amid oluşumu	Biyokömürlü çürütücülerde TAN 3,43–3,76 g/L, kontrolde 4,28 g/L (Zhang et al., 2019)
VFA kontrolü ve asitlenme yönetimi	Asitlenmiş reaktörlerin hızlı toparlanması; VFA oksitleyici bakterilerin yüzeye tutunması (Yan et al., 2022)	VFA dalgalanması 1500 mg HAc/L'nin altında kalmış, kontrolde pH ~6,5'e gerilemiştir (Yan et al., 2022)

Mekanizma	Etki yolu	Temsili nicel kanıt
Mikrobiyal seçici zenginleşme	Metanojen ve elektrotrofik mikroorganizma bolluğunun artışı; DIET ile ilişkili taksonların zenginleşmesi	Metanojen ve elektrotrofik mikroorganizmalar %24,6–43,8 artmıştır (Osman et al., 2022); *Methanobacterium, Methanosaeta* ve *Methanosarcina* topluluğun %90'ını oluşturmuştur (Valentin et al., 2023)
Adsorpsiyon ve inhibitör giderimi	Amonyak, sülfit, antibiyotik ve ARG adsorpsiyonu	Sefazolin kaynaklı metan düşüşü (%28,14'e kadar) biyokömürle hafifletilmiş; dirençli bakteri bolluğu %1,00'ın altına inmiştir (You et al., 2025)
H_2S giderimi ve biyogaz iyileştirme	Fizisorpsiyon ve kemisorpsiyon; Fe emprenyesiyle güçlendirme	Demir emprenyeli akçaağaç biyokömüründe 23,9 mg H_2S/g (modifiye edilmemişin 3,9 katı) (Choudhury & Lansing, 2020); yaprak biyokömürüyle %84,2 H_2S giderimi (Chiappero et al., 2020)

Kaynaklar: (Yang et al., 2025); (Martins et al., 2018); (Osman et al., 2022); (Zhang et al., 2019); (Yan et al., 2022); (Valentin et al., 2023); (You et al., 2025); (Choudhury & Lansing, 2020); (Chiappero et al., 2020)

Uygulama Önerileri

Uygulamada biyokömür önce hammadde, piroliz koşulları, iletkenlik ve yüzey özellikleri bakımından tanımlanmalı; ardından kontrol gruplu doz denemeleriyle değerlendirilmelidir. Metan verimiyle birlikte üretim hızı, VFA, pH ve amonyak izlenmelidir. Ekonomik karar, ilave gazın enerji değeriyle katkının toplam maliyetini karşılaştırmalıdır. Modifiye ürünlerde ve arıtma çamuru uygulamalarında çürütme artığının tarımsal kullanımına ilişkin güvenlik değerlendirmesi ihmal edilmemelidir (Chen et al., 2024).

Gelecek Araştırmalar

Gelecek araştırmaların önceliği, laboratuvar bulgularını pilot ve endüstriyel ölçekli sürekli sistemlerde doğrulamaktır. Uzun süreli kararlılık, biyokömürün yeniden kullanımı, metal ve kirleticilerin akıbeti ile tedarik zinciri etkileri birlikte incelenmelidir. Mekanizma çalışmalarında mikrobiyal bolluk verileri, doğrudan elektron transferi kanıtlarından ayrılmalı; ekonomik ve çevresel değerlendirmeler de aynı performans temeline dayanmalıdır. Biyokömür–AD entegrasyonu böylece atık, enerji ve besin geri kazanımını birleştirebilir; ancak teknik ve ekonomik uygulanabilirlik her sistem için ayrıca gösterilmelidir (Chen et al., 2024).

Araştırmaların karşılaştırılabilirliği için hammadde, piroliz koşulları, dozun hesaplama temeli ve reaktörün işletim biçimi birlikte raporlanmalıdır. Metan konsantrasyonu, toplam gaz hacmi ve uçucu katı başına verim ayrı ayrı sunulmalı; kontrol grubuna göre hesaplanan artışın hangi göstergeye ait olduğu açıklanmalıdır. Özellikle yüksek yüzdeli artışlarda başlangıç performansı ve deney süresi göz ardı edilmemelidir. Bu yaklaşım, farklı çalışmalardaki sayısal sonuçların evrensel bir verim katsayısına dönüştürülmesini önler ve ölçek büyütme kararlarına daha sağlam bir temel sağlar.

Üretken Yapay Zekâ Kullanım Beyanı: Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde, TÜBİTAK'ın Destek Süreçlerinde Üretken Yapay Zekânın (ÜYZ) Sorumlu ve Güvenilir Kullanımı Rehberinde belirtilen ilkeler doğrultusunda, yalnızca dil bilgisi, akademik anlatım ve metin akışının iyileştirilmesi amacıyla büyük dil modellerinden (Large Language Models, LLM) yararlanılmıştır. Çalışmanın bilimsel içeriği, yorumları, kaynakların doğrulanması ve nihai metnin kontrolü yazar tarafından yapılmıştır.

Kaynakça

Ambaye, T. G., Rene, E. R., Dupont, C., Wongrod, S., & Hullebusch, E. D. van. (2020). Anaerobic Digestion of Fruit Waste Mixed With Sewage Sludge Digestate Biochar: Influence on Biomethane Production. *Frontiers in Energy Research*, *8*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00031

Baldi, F., Pecorini, I., & Iannelli, R. (2019). Comparison of single-stage and two-stage anaerobic co-digestion of food waste and activated sludge for hydrogen and methane production. *Renewable Energy*, *143*, 1755–1765. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.122

Bardi, M. J., Mutunga, J. M., Ndiritu, H., & Koch, K. (2023). Effect of pyrolysis temperature on the physiochemical properties of biochar and its potential use in anaerobic digestion: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, *32*, 103349. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103349

Chen, B. Y., Zeng, H., Yang, F., Yang, Y., Qiao, Z., Zhao, X., Li, W., & Wu, F. (2024). Functional biochar as sustainable precursors to boost the anaerobic digestion of waste activated sludge from a circular economy perspective: a review. *Biochar*, *6*(1). https://doi.org/10.1007/s42773-024-00345-y

Chen, S., Rotaru, A., Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Liu, F., Fan, W., Nevin, K. P., & Lovley, D. R. (2014). Promoting Interspecies Electron Transfer with Biochar. *Scientific Reports*, *4*(1), 5019. https://doi.org/10.1038/srep05019

Chiappero, M., Berruti, F., Mašek, O., & Fiore, S. (2021). Semi-continuous anaerobic digestion of mixed wastewater sludge with biochar addition. *Bioresource Technology*, *340*, 125664. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125664

Chiappero, M., Norouzi, O., Hu, M., Demichelis, F., Berruti, F., Maria, F. D., Mašek, O., & Fiore, S. (2020). Review of biochar role as additive in anaerobic digestion processes. *Edinburgh Research Explorer (University of Edinburgh)*, *131*, 110037. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110037

Choudhury, A., & Lansing, S. (2020). Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(1), 104837. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104837

Dutta, S., He, M., Xiong, X., & Tsang, D. C. W. (2021). Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review. *Bioresource Technology*, *341*, 125915. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125915

Hoang, A. T., Goldfarb, J. L., Foley, A., Lichtfouse, É., Kumar, M., Xiao, L., Ahmed, S. F., Said, Z., Luque, R., Bui, V. G., & Nguyễn, X. P. (2022). Production of biochar from crop residues and its application for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *363*, 127970. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127970

Kalantzis, D., Daskaloudis, I., Lacoere, T., Stasinakis, A. S., Lekkas, D., Vrieze, J. D., & Fountoulakis, M. S. (2023). Granular activated carbon stimulates biogas production in pilot-scale anaerobic digester treating agro-industrial wastewater. *Bioresource Technology*, *376*, 128908. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128908

Kumar, M., Dutta, S., You, S., Luo, G., Zhang, S., Show, P. L., Sawarkar, A. D., Singh, L., & Tsang, D. C. W. (2021). A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. *Journal of Cleaner Production*, *305*, 127143. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127143

Lăcureanu, A.-M., & Cocârță, D. M. (2025). *Experimental Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and Food Waste for Biogas Production: Influence of biochar addition on methane yield*. 1–4. https://doi.org/10.1109/ciem67454.2025.11283648

Martins, G., Salvador, A. F., Pereira, L., & Alves, M. M. (2018). Methane Production and Conductive Materials: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, *52*(18), 10241–10253. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01913

Masoud, A., Samy, M., Allam, N. E., Dhar, B. R., Meshref, M. N. A., & Elagroudy, S. (2025). Improving the biogas production in two-phase anaerobic digester of food waste using sugarcane bagasse-derived biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(16), 22959–22970. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06724-0

Moscoviz, R., Trably, É., Bernet, N., & Carrère, H. (2018). The environmental biorefinery: state-of-the-art on the production of hydrogen and value-added biomolecules in mixed-culture fermentation. *Green Chemistry*, *20*(14), 3159–3179. https://doi.org/10.1039/c8gc00572a

Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Elgarahy, A. M., Ayyad, A., Mehta, N., Ng, K. H., El-Monaem, E. M. A., Eltaweil, A. S., Hosny, M., Hamed, S. M., Fawzy, S., Yap, P., & Rooney, D. W. (2023). Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(3), 1419–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7

Osman, A. I., Fawzy, S., Farghali, M., El-Azazy, M., Elgarahy, A. M., Fahim, R. A., Maksoud, M. I. A. A., Ajlan, A. A., Yousry, M., Saleem, Y., & Rooney, D. W. (2022). Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *20*(4), 2385–2485. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x

Tayibi, S., Monlau, F., Bargaz, A., Jiménez, R., & Barakat, A. (2021). Synergy of anaerobic digestion and pyrolysis processes for sustainable waste management: A critical review and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *152*, 111603. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111603

Valentin, M. T., Luo, G., Zhang, S., & Białowiec, A. (2023). Direct interspecies electron transfer mechanisms of a biochar-amended anaerobic digestion: a review. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *16*(1), 146. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02391-3

Vuppaladadiyam, A. K., Jena, M. K., Hakeem, I. G., Patel, S., Veluswamy, G., Thulasiraman, A. V., Surapaneni, A., & Shah, K. (2024). A critical review of biochar versus hydrochar and their application for H2S removal from biogas. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *23*(3), 699–737. https://doi.org/10.1007/s11157-024-09700-8

Wang, Z., Zhang, M., Qian, X., Ni, Y., Zhou, X., & Yang, J. (2026). Mechanistic insights into promoted biogas production and reduced antibiotic resistance genes' risks of dry anaerobic digestion of organic wastes with biochar addition. *Bioresources and Bioprocessing*, *13*(1), 7. https://doi.org/10.1186/s40643-025-01003-2

Xiao, L., Lichtfouse, É., Kumar, P. S., Wang, Q., & Liu, F. (2021). Biochar promotes methane production during anaerobic digestion of organic waste. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(5), 3557–3564. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01251-6

Xu, Q., Liao, Y., Cho, E., & Ko, J. H. (2020). Effects of biochar addition on the anaerobic digestion of carbohydrate-rich, protein-rich, and lipid-rich substrates. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *70*(4), 455–467. https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1733133

Xue, N., Deng, C., Hickey, D. T., Hackula, A., O'Shea, R., Wall, D., Lin, R., & Murphy, J. D. (2023). Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, *423*, 138723. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138723

Yan, Y., Yan, M., Ravenni, G., Angelidaki, İ., Fu, D., & Fotidis, I. A. (2022). Biochar enhanced bioaugmentation provides long-term tolerance under increasing ammonia toxicity in continuous biogas reactors. *Renewable Energy*, *195*, 590–597. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.071

Yang, C., Liu, Z., Liu, W., Qiu, Y., Zhang, S., Zhang, X., Wang, M., Wu, H., Lyu, H., Huang, J., Liu, J., Wang, Y., He, S., Gu, D., Guo, X., Yang, X., Xie, T., Chen, H., & Yao, Y. (2025). Graphitized Biochar Derived from Agricultural Wastes Enhances Methanogenesis via Conductivity-Driven Direct Interspecies Electron Transfer. *Advanced Science*, *12*(41). https://doi.org/10.1002/advs.202508739

You, J., Farghali, M., Yoshida, G., Yamamoto, H., Iwasaki, M., Shimizu, K., Maseda, H., Andriamanohiarisoamanana, F. J., & Ihara, I. (2025). Biochar-assisted control of antibiotic-resistant bacteria and methane yield optimization in two-stage anaerobic digestion under organic load and antibiotic stress. *Environmental Research*, *279*, 121679. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121679

Zhang, M., Li, J., Wang, Y., & Yang, C. (2019). Impacts of different biochar types on the anaerobic digestion of sewage sludge. *RSC Advances*, *9*(72), 42375–42386. https://doi.org/10.1039/c9ra08700a

BÖLÜM 4

BOYA DEGRADASYONU ve ATIK SULARDA TOHUM ÇİMLENMESİ

BEYHAN TAHTA[1]
FERUDUN KOÇER[2,3]

Giriş

Günümüz dünyasında artan su ihtiyacını karşılamak için alternatif yollar aranmaktadır. Bu sorunun giderilmesi için çevreye herhangi bir zarar vermeden fotokatalitik mekanizma yoluyla su arıtımında etkili bir katalizörlerin geliştirilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır.

CeO_2-NPs/GO/PAM hidrojeli geri kazanımı ve yeniden kullanılabilirliği dokuzuncu döngüde, metilen mavisi fotokatalitik bozunmasını %75'i azalttı (Kalaycıoğlu et al., 2023).

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kimya Bölümü, Orcid: 0000-0001-9767-5394
[2] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Biyomühendislik ve Bilimleri ABD, Orcid: 0000-0002-8749-7106
[3] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, ÜSKİM

AgNPs nanopartiküller tekstil atık suyundan temiz su elde etmek için Asit Kırmızı 37' nin fotokatalitik aktivitesinin yüzde giderimi Beer-Lambert yasasına göre hesaplandı (Elbadawy et al., 2023).

Fotokatalizde geri dönüştürülebilirlik çalışmaları, fotokatalizörün katalitik aktivitesini önemli ölçüde kaybetmeden birden fazla yeniden kullanılabilme yeteneğini belirlemeyi amaçlar. Reaktif sarı-145' in bozunması TiFEBC1' in geri kazanım ve yeniden kullanımı optimum koşullar altında gerçekleştirildi ve on ardışık bozunma deneyi döngüsünden sonra katalitik aktivitedeki azalma yaklaşık %5' tir. Bu durum TiFEBC1' in, iyi bir kararlılık ve geri kazanım için yüksek performans sergiledi (Kenda et al., 2024). Luan ve Liu 2026 yılında yaptıkları çalışmada; Parlak yeşil (BLG) boyasının bozunmasında Z-şemalı $Ho_2BiNbO_7/ZnBiTmO_4$ heteroeklem (HZ) fotokatalizörü kullanılarak BLG'nin bozunma oranda %99,47 oranında yüksek verim elde ettiler (Luan and Liu, 2026).

CuO NPs (Shkir et al., 2025); MgO NPs (Kumar et al., 2022); α-Fe_2O_3 NPs (Goudjil et al., 2024); TiO_2 NPs (Verma et al., 2023); $ZnS/rGO/g\text{-}C_3N_4$ (Shyagathur et al., 2025); ZnO/Co_3O_4 (Asim et al., 2026); $g\text{-}C_3N_4/CoFe_2O_4$ (Weldekirstos et al., 2024); ZnO/rGO (Bekele et al., 2025); $Mn\text{-}ZnO/g\text{-}C_3N_4$ (Saqib et al., 2026); $Ag_3PO_4/g\text{-}C_3N_4$ (Alsulmi et al., 2026); $CNF/rGO/WO_3$ (Yifira et al., 2025); $CuMnFe_2O_4$@AC (Akbar et al., 2026); CuO@NiO@Fe_2O_3 (Boonserm et al., 2026); $Co_{0.5}Mg_{0.5}Fe_{1.92}Gd_{0.08}O_4$ (Meena et al., 2026); $MgFe_2O_4$ (Cabrera et al., 2026); Z-şemalı $Cu/CuBi_2O_4/Bi/Bi_2O_3$ (Fang et al., 2025); Nd^{3+}-doped CeO_2 NPs (Madaan et al., 2025); PTh/Fe_3O_4/RGO (Husain et al., 2025) vb. gibi diğer birçok malzeme de araştırmacılar tarafından fotokatalizör olarak kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada, yaygın olarak rastlanan boya kirleticileri olan metilen mavisi (MB), Rodamin-B (RhB), malakit yeşili (MG),

metil turuncusu (MO), alizarin kırmızısı (AR) ve kongo kırmızısının (CR) adsorpsiyon verimliliği için kobalt (Co) tabanlı bir MOF (Co-PTC) kullanıldı. Yukarıda sayılan organic kirleticelerin arasında en iyi %79,3 oranınla MG'de adsorpsiyon elde edildi (Anand & Sunajadevi, 2024). Sol-jel yöntemiyle sentezlenen BaFeO katalizörü Parlak yeşilin (BG) degratasyonunda kullanıldı ve olası bozunma aşaması GC/MS) ve LC/MS yöntemleriyle ana ve ara ürünler belirlendi (Oi et al., 2020).

Heterojen Fenton katalizörü olarak karbonize mısır koçanı ile desteklenmiş manyetik Fe_3O_4/RCC nanopartikülleri MO bozunmasında 10 döngünün ardından, bozunma verimliliği %93'ün üzerindedir. Bu durum, katalizörün kararlı bir yapıya ve iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir (Chen et al., 2025). Sentezlenen ZnO-Zeolit kompoziti MB boyasının maksimum bozunmanın pH 8 değerinde olduğu ve saf zeolite kıyasla ZnO-Zeolit kompoziti %96,70 gibi kayda değer bir fotokatalitik aktivite verimi sağlamaktadır (Kabadayi et al., 2024).

Bu derleme çalışmasında, toksik boya içeren atık suların arıtım işlemlerinden sonra özellikle tohum çimlenmesindeki etkileri, sürdürülebilir tarım için kullanılmasına değinildi. Fotokataliz basamakları, boyaların bozunma ürünlerinin LC-MS, ESI/MS, HR-MS, MS yapısı ve m/z değerlerinden bahsedildi. Fotokatalizörlerin yeniden kullanılabilirliğinin önemi ve pHPzc değerinin fotokatalitik bozunmadaki etkin rolü açıklanmıştır.

Boyar Maddelerin Karekterizasyonu ve Tohum Çimlenmesi

Katalizör Geri Dönüşümü ve Kararlılık Testi

Fotokatalizörler pratik uygulama için, atık sudaki organikboyaların bozunmasında başarılı bir strateji haline gelmiştir ve katalitik kararlılık ve katalizörün aktivite kaybı olmadan yeniden kullanılabilirliği bir katalizör seçimi için temel parametrelerdir (Alzahrani et al., 2025; Ahmad et al., 2025).

Nassar ve ark. yaptıkları çalışmada, fotokatalizörlerin yeniden kullanımını UV ışığı ve H_2O_2 varlığında incelendi ve dört döngüden sonra MB uzaklaştırma yüzdesi MCC/S-VO_2 için %92,5' ten %85,5' e ve S-VO_2 için %100'den %87' ye düşmüştür. Fotokatalizörün tekrar kullanım öncesi ve sonrasında kristal fazda herhangi bir değişiklik olmadığı MCC/S-VO_2'nin XRD ve FT-IR karakterizasyonlarıyla da doğrulandı (Nassar et al., 2023).

Liang ve ark. öğütme ve kalsinasyon yoluyla ZnO nanopartiküllerini sentezledi, ZnO'nun fotokatalitik performansının yanısıra yapısal ve kimyasal kararlılık beş döngüden sonra ZnO'nun yüksek fotokatalitik aktiviteyi koruduğunu %98,47’ lik orandan %91,28’ e çok az bir değişim olduğu görülmektedir (Liang et al., 2024).

Genel olarak, bu hafif azalmaların nedenleri arasında;

1. Geri kazanım aşamasında santrifüjleme ve kurutma işlemlerinden kaynaklı malzeme kayıbından dolayı sonraki döngüye daha düşük bir doza başlanması yüzey katalitik aktivitesini azaltır ve performansı düşürür.
2. Manyetik nanopartiküllerin agregasyon.
3. Fotokatalizörün uzun süreli kullanımı, adsorptif katalitik yüzey aktif bölgelerinin tıkaması gibi sebebler sıralanabilir (Moosavi et al., 2020). Fotokatalizörlerin toksik boyalarındaki fotobozunum giderimi ve defalarca kullanımı büyük önem arzetmektedir (Tablo 1).

Tablo 1 Farklı kompozitlerin,farklı boyalardaki bozunum yüzdesi ve geri dönüşüm durumları

No	Katalizör Kompozitler	Boya	Bozunma yüzdesi (n =1)	Döngü sayısı (n)	Döngüdeki en son bozunma yüzdesi	Referans
1	Z-şemalı Bi_2WO_6 /NiO	Rodamin B	97.52	4	86.72	Qu et al., 2026
2	Fe_3O_4/AC/TiO_2	Metilen mavisi	98	7	93	Moosavi et al., 2020
3	%6 Co katkılı CdS	Metilen mavisi	98.8	7	55.1	Shaban et al., 2020
4	3ZF5-BSCH	Metilen mavisi	97,4	8	79,7	Zhang et al., 2024
5	MMT@Fe_3O_4@Ag	Metilen yeşili	100	3	92	Altun et al., 2025
6	Fe_2O_3-zeolit	Metilen mavisi	~100	10	~97	Mohamed et al., 2022
7	AMOF	Metilen mavisi	90.7	4	87.0	Kitchamsetti et al., 2023
8	Ag/UiO-66	Metilen mavisi	~99	5	~90	Ibrahem et al., 2026
9	Ag_2O@CRA	Metilen mavisi	100	5	91.4	Adday et al., 2024
10	ZQ5	Metilen mavisi	97.7	6	85.2	Bansal et al,. 2025
11	rGO/CdSe/Fe3O4	Metilen mavisi	100	4	83	Moghanlou et al., 2025
12	S1100	Metil oranj	93	5	74	Wang et al., 2019
13	wool/Fe_3O_4@TiO_2/UiO-66	Metilen mavisi	99	5	73.2	Tian et al., 2022
14	rGO-Bi_2S_3	Metilen mavisi	99	5	98.5	Chufa et al., 2021
15	ZnO/NCQD-2	Rodamin B	99	5	95	Mandal et al., 2021
16	aACF/ZnO/CuO@Al_2O_3	Metilen mavisi	95	4	95	Foroushani et al., 2025
17	G-TiO_2	Metilen mavisi	96	5	91	Shimi et al., 2022
18	2D Ti_3C_2Tx MXene	Kango kırmızısı	100	5	94	El-Mas et al., 2025
19	CdS-4	Rodamin B	99.60	7	99.60	Lin et al., 2024
20	MgO@BC-ZM NC	Kango kırmızısı	98	7	51	Shah et al., 2026
21	30B/ZnO/Ag_2O	Kristal viyole	99,21	6	90,37	Foroutan et al., 2022
22	NSO_{-4}	Kango kırmızısı	94	5	92,3	Khatun et al., 2023
23	ZnO/CuO/Fe_2O_3	Toluidin mavisi	99	5	97.12	Serouti et al., 2024

24	$NiFe_2O_4$	Kristal viyole	75.50	3	73	Divakara et al., 2025
25	NiS–ZnS NC	Kristal viyole	100	7	87.8	Afzal et al., 2026
26	CeNiSCS	Kongo kırmızısı	85	4	44	Langa et al., 2026
27	$NiFe_2O_4$	Metilen mavisi	98.99	5	95.68	Khalaji, 2024
28	$MgFe_2O_4$	Rodamin B	91	6	88	Busharat et al., 2024

Radikal Yakalama

Yapılan bir çalışmada; Ti_3C_2-TiO_2 foto katalizörünün fotokatalitik mekanizmasını belirlemek için MO çözeltisinde radikal yakalama testi çeşitli kimyasallar kullanılmıştır. Kısaca bunlardan bahsetmek gerekirse, sırasıyla h^+, COH, CO_2 yakalayıcısı olarak trietanolamin (EDTA), tert-butanol (t-BuOH) ve p-benzokinon (p-BQ) kullanıldı. EDTA, metil turuncusu bozulma verimliliğinde kayda değer bir etki göstermedi; bu da deliklerin (h^+) reaksiyondaki rolünün çokta etkili olmadığını gösterdi. Öte yandan, p-BQ ve t-BuOH tutucuları radikallerin MO fotokatalitik verimliliğinde etkin rol oynadığını gösterir (Hieu et al., 2021).

Işık altında S1100 numunesi elektronlar ve boşluklar oluşturur ve MO' nun bozunmasında etkin rol oynar. Bu durumun değelendirilmesi amacıyla; hidroksil (·OH) radikalleri için tert-butanol, süperoksit ($\cdot O2^-$) radikalleri için L-askorbik asit kullanıldı ve boşluklar (h^+) için disodyum etilendiamintetraasetat (EDTA-2Na) eklendi. MO'nun bozunmasında $\cdot O2^-$ radikalleri ve h^+ boşlukları belirgin şekilde düşmektedir. Buna karşılık, tert-butanol (·OH) radikalleri MO' nun bozunması üzerinde dikkate değer etkisi olmamıştır (Wang et al., 2019).

BS4'ün MO çözeltisini karanlık ortamdaki katalizde rol oynayan ROS türlerini belirlemek amacıyla süperoksit radikallerini ($\bullet O_2^-$) yakalamak için p-benzokinon (p-BQ), hidroksil radikalleri (•OH) için izopropil alkol (IPA), elektronları ve hidrojen peroksit için gümüş nitrat ($AgNO_3$) ve sodyum pirüvat (SP) kullanıldı.

Fotobozunmada, $AgNO_3$ kullanılması metil turuncusunun fotokatalitik aktivitesinde elektronlar dominant olduğu yapılan deney ile belirlendi (Rajendran et al., 2026).

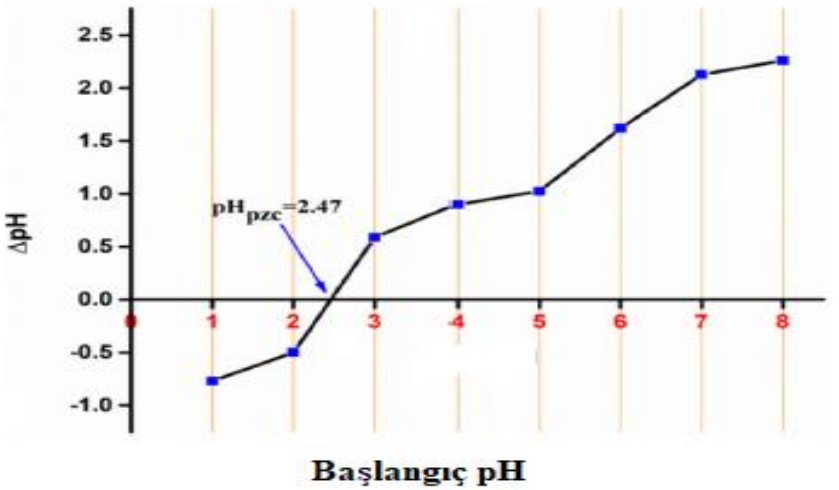
Yapılan bir çalışmada; Kongo kırmızısının (CR) fotokatalitik bozunma sürecinde etkili olan ajanları belirlemede boşluk (h^+) için İzopropil alkol, hidroksil radikali (OH.) tesbitinde etilendiamin tetraasetik asit (EDTA) ve gümüş nitrat ($AgNO_3$) ise elektron (e^-) yakalayıcıları olarak kullanıldı. CR boyasının bozunmasında IPA ve EDTA' nın varlığı hem boşlukların hem de hidroksil gruplarının eşit derecede önemli olduğunu gösterdi (Beegun et al., 2024).

pH ve Sıfır Yük Noktasının Etkisi (pHpzc)

Belirli bir katalizör yüzeyinin toplam yükünün sıfır olduğu pH değerine pHpzc denir. Fotokatalizde pH seviyesi, sulu sistemlerden kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında kritik bir faktördür; adsorban malzemenin yüzey yükünü etkilediği için çok önemlidir ve reaktif oksijen türlerinin üretimini etkiler. Genel olarak pH_{PZC} değerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemi tanımlamak gerekirse; 0,1 $mol \cdot L^{-1}$ HCl ve 0,1 $mol \cdot L^{-1}$ NaOH çözeltileri kullanılarak farklı pH' larda hazırlanır. Hazırlanan süspansiyonlar ağızları kapalı bir şekilde, 25°C sıcaklıkta çalkalamalı inkübatörde, 24 saat boyunca bekletildi. Daha sonra, çözeltiler kalitatif filtre kağıdından süzülerek nihai pH (pHf) değerleri iki tekrarlı olacak şekilde ölçüm yapıldı (Alvez-Tavar et al., 2025).

Yapılan çalışmada, N-C-dots/SgCN/gCN yapısının pHpzc 2,47 olarak hesaplandı. N-C-dots/SgCN/gCN katalistinin pHpzc değerinin altında yüzeyinin pozitif yük kazanacağı anlamına gelir. Böyle bir durumda, pozitif yüklü N-C-dots/SgCN/gCN ile katyonik RhB boya molekülleri arasında oluşan elektrostatik itmelerin artmasından dolayı, fotokatalitik boya bozunum yüzdesinin azalmasına yol açar (Şekil 1) (Singh et al., 2025).

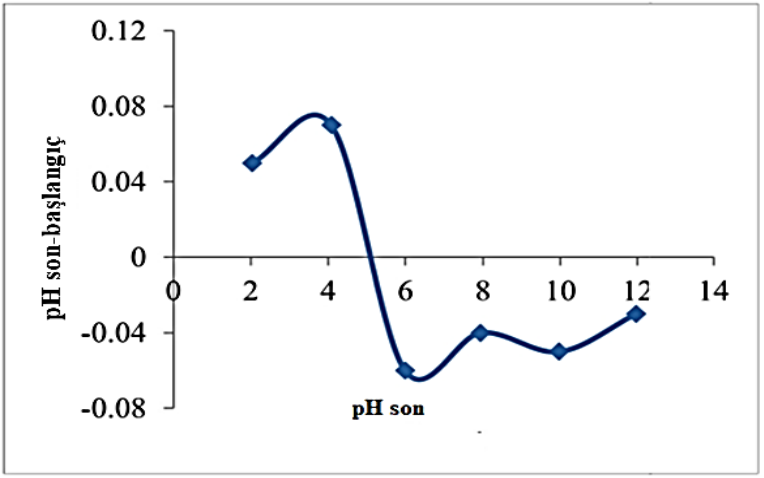
Şekil 1 N-C-dots/SgCN/gCN yapısının pHpzc değerinin gösterimi



Metil oranj (MO) boyar maddesinin CCNH-P kompoziti üzerine adsorpsiyonunda yüksek giderim değerinin pH 4'te gözlendi. Bu pH değerinde CCNH-P yüzeyi pozitif yük taşımaktadır ve MO yapısındaki negatif yüklü sülfonat grupları ($–SO_3^-$) ile elektrostatik çekimi artırmaktadır. Fakat, daha düşük pH değerlerinde, kompozit yüzeyindeki aktif fonksiyonel grupların aşırı protonlanması, katyonik gruplar ile yüzey arasında elektrostatik itmelerden dolayı boyanın giderimi azalmaktadır. Çözelti pH'ının 4'ün üzerinde anyonik boyar madde molekülleri ile hidroksit iyonları (OH^-) arasında aktif bağlanma bölgeleri için yaşanan rekabet nedeniyle adsorpsiyonda azalmayla birlikte giderim verimliliği düşmüştür. CCNH-P için sıfır yük noktası (pzc) değeri yaklaşık 6,2 olarak belirlendi. Bunun anlamı tam olarak pH 6,2' nin altında sorban yüzeyinin pozitif yük taşır ve anyonik boyar maddelerde elektrostatik çekim yoluyla tutulmasını teşvik eder (Fadhil et al., 2026).

ZST pcz değeri 5.23 olarak belirlendi, bu durum parçacıkları pozitif yüklü hale getirdi, anyonik MO molekülleriyle daha güçlü bir etkileşime girmesinin kanıtı pH 4 seviyesinde en verimli fotokataliz olayının gerçekleşmesidir (Şekil 2) (Alamaw et al., 2025).

Şekil 2 ZST ait pcz grafiği

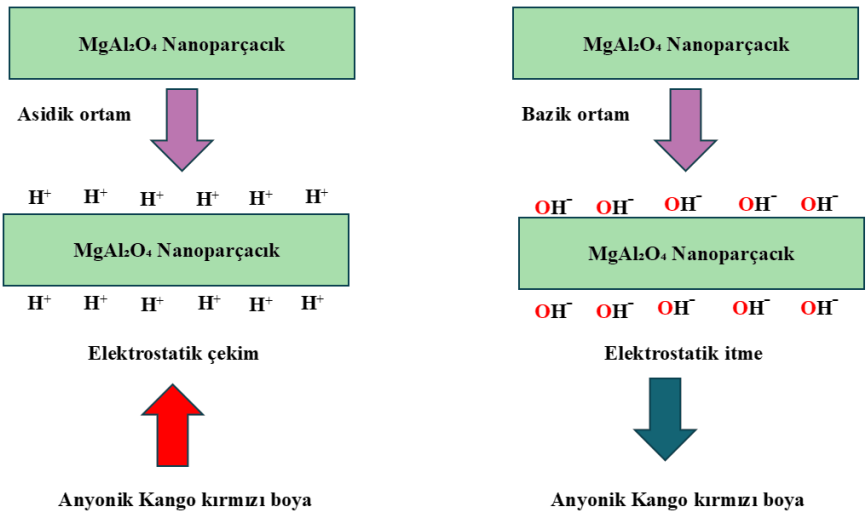


Metilen mavisinin bozunma verimi pH 8–12 aralığında %95' in üzerinde iyi giderim değerine ulaştığını göstermektedir. pH değerinin pzc'nin (7,8) üzerinde olduğu durumlarda, ZQ5 yüzeyi net bir negatif yük kazanır; bu durum pozitif yüklü MB boya moleküllerine karşı elektrostatik etkileşimler boya adsorpsiyonunda daha verimli bir yük transferini kolaylaştırır ve bazik ortamdaki OH^- iyonlarıyla etkileşimin artması sayesinde reaktif oksijen türünün (ROS) oluşumuna yol açtığını, özellikle de hidroksil radikallerinin (•OH) oluşumunu yüksek fotokatalitik bozunma verimini artırır (Bansal et al., 2025).

Ultraviyole ışık koşulları altında $MgAl_2O_4$ nanopartikülleri pH 3' te yüzde 99,22' lik bozunma sergilerken pH 9' da tam tersi yönde yüzde 2.09' a düşmektedir. Bu durum, anyonik Kongo kırmızısı boyası pozitif yüklü hidrojen iyonlarıyla tarafından

çekilmektedir ve bozunma yüzdesinde artışa neden olmaktadır. Karşıt olarak, alkali ortamda, negatif yüklü hidroksit iyonları Kongo kırmızısı boyasının itilmesine neden olur ve fotokatalitik bozunma yüzdesinde azalmaya yol açar. Yukarıda anlatılanlar şematik olarak aşağıda (Şekil 3) gösterildi (Al-Farraj & Abdelrahman, 2024).

Şekil 3 Kongo kırmızısı boyasının $MgAl_2O_4$ nanoparçacıklarıyla etkileşimleri



Boya Bozunmasındaki Muhtemel Tepkimeler

Fotokatalizör olarak sentezlenen (Sr_2FeMoO_6) numunesi ışık altında uyarıldı yüzeyde elektronlar ve deliklerin oluşmasıyla metil mavisi (MB) çözeltisinde fotokatalitik aktivitesi incelendi. Fotobozunma için muhtemelen Fe^{2+} iyonları, Sr_2FeMoO_6 yüzeyinde soğurulmuş olan O^2 molekülüne bir elektron vererek Fe^{3+} iyonuna dönüşebileceği gibi bu süreçte O^{2-} süperoksit radikalleride oluşabilir. Öte yandan, Mo^{6+} iyonları, Sr2FeMoO$_6$'nın iletim bandındaki elektronları yakalayarak Mo^{5+} iyonlarını oluşturabilir. Dahası; fotonlar vasıtasıyla değerlik bandında oluşan boşluklar ise H_2O ve OH^- iyonlarıyla doğrudan tepkimeye girer oluşması

muhtemel $\bullet O_2^-$ ve •OH türleri, metilen mavisinde boyanın renginin gideriminde aktif olarak rol oynar. MB'nin bozunmasında önerilen tepkimeler aşağıda verilmiştir (Li et al., 2019).

$Sr_2FeMoO_6 + hv \rightarrow Sr_2FeMoO_6$ ($h^+ + e^-$çifti)

$Fe^{2+} + O_2 \rightarrow Fe^{3+} + {}^{\cdot}O_2$

Sr_2FeMoO_6 (e) + $O_2 \rightarrow Sr_2FeMoO_6 + {}^{\cdot}O_2$

$Mo_6 + OH^- \rightarrow Mo_5^+ {}^{\cdot}OH$

Sr_2FeMoO_6 (h^+) $OH^- \rightarrow Sr_2FeMoO_6$ ${}^{\cdot}OH$

Metil mavisi ${}^{\cdot}OH$ (veya ${}^{\cdot}O^2$) → nihai ürün

Işık varlığında elektronlar elektronlar (e^-), ortamdaki oksijeni (O_2) yakalayarak süperoksit radikallerini (O_2^-) oluştururken (h^+) soğuran su molekülü ise •OH radikalleri oluştururlar. Sentezlenen BGFSO/GNP'nın Kongo kırmızısı (CR) çözeltisindeki fotolatalitik reaksiyonun temel adımları aşağıdaki denklemlerle gösterildi: (Fatima et al., 2020)

BGFSO/GNP + Görünür Işık → Elektron Üretimi (e^-)

e^- (BGFSO) + $O_2 \rightarrow O_2^-$

e- (GNPs) + $O_2 \rightarrow O_2^-$

$h^+ + H_2O \rightarrow$ •OH

CR + $O_2^- \rightarrow H_2O + CO_2$

CR + •OH → $H_2O + CO_2$

Görünür ışığa maruz kaldığında, MoS2 yüzeyi ışık etkisiyle fotokatalizörün iletim bandındaki (CB) elektronlar, yüklü taşıyıcılar sayesinde CuO' nun iletim bandına aktarılır ve gCN ise bu enerji depolayan bu elektronları bünyesine alır. Kısacası, MoS2'nin değerlik bandında (VB) çok sayıda boşluk (h^+) meydana gelirken öte yandan elektronlar (e^-), oksijen molekülleriyle tepkimeye girerek

$O_2^{\bullet-}$ radikallerini oluşturur. Fotokatalizörlerin aktif yüzeyinde sayısız oluşan boşluklar (h+) ve elektronlar (e^-), bir dizi tepkime sonucunda hidroksil radikallerini ($OH^\bullet$) meydana getirir. Oluşan $O_2^{\bullet-}$ ve $OH^\bullet$ radikalleri, MO' yu oksitleyerek toksik olmayan çevre dostu ürünlere dönüştürebilir. Radikallerin oluşumuna dair muhtemel denklemler aşağıda ifade edildi (Alomayrah et al., 2024).

$$CuO/MoS_2 + hv \rightarrow CuO\ (\ e^-_{CB} + h^+_{VB}\ ) + MoS_2(\ e^-_{CB} + h^+_{VB}\ )$$

$$CuO\ (e^-_{CB}) + gCN \rightarrow CuO + gCN\ (e^-)$$

$$gCN\ (e^-) + O_2 \rightarrow \cdot O_2^- + gCN$$

$$MoS2\ (h^+_{VB}) + H_2O \rightarrow H^+ + OH^- + MoS_2$$

$$MoS2\ (\ h^+_{VB}) + OH^- \rightarrow MoS_2 + \cdot OH$$

$$\cdot O^-_2 + OH\cdot + MO \rightarrow \text{Nihai ürün}$$

Foto ışınlamadan sonra delikler ve elektronların oluşması kuvvetle muhtemeldir. Rodamin B boyasının atık sudan uzaklaştırılmasında baskın olacak yeni reaktif türler oluşturabilir. Manyetik Fe_3O_4/BiOCl katalizör olarak kullanılır ve Rodamin B boyasının fotokatalitik bozunma mekanizması aşağıda gösterildi (Nonthing et al., 2025).

$$Fe_3O_4/BiOCl + \text{ışık} \rightarrow Fe_3O_4/BiOCl + e^- + h^+$$

$$e^- + O_2 \rightarrow \bullet O_2^-$$

$$\bullet O_2^- + 2H_2O + e^- \rightarrow 2\bullet OH + 2OH^-$$

$$h^+ + \text{RhB boyası} \rightarrow \text{bozunmuş bileşikler}$$

$$\bullet OH + \text{RhB boyası} \rightarrow \text{bozunmuş bileşikler}$$

ZnO/NCQD kompoziti kullanılarak katyonik bir boya olan Rrodamin B boyasınında artan fotokatalitik aktivitenin temel nedeni, elektron-delik çiftlerinin birbirinden ayrılmasıdır. Fotonla uyarılan elektronlar, çözünmüş oksijeni süperoksit radikallerine ($\cdot O_2^-$) indirgeyebilir.

Bu radikal, hidrojen peroksit (H_2O_2), hidroperoksil radikali ($HO^{\cdot}{}_2$) ve hidroksil radikaline ($OH\cdot$) dönüştürülebilirken delikler (h^+), hidroksil iyonlarıyla reaksiyona girerek hidroksil radikalleri oluşturur. Fotokatalitik ilerlemenin sonlarında RhB mineral asitlere, CO_2' ye ve H_2O gibi nihai ürünler oluşur. Muhtemel fotokatalitik reaksiyon sıralaması aşağıda gösterildi (Mandal et al., 2021).

$ZnO/NCQD + h\nu \rightarrow ZnO\ (e^-) + NCQDs\ (h+)$

$e^- + O_2 \rightarrow {}^{\cdot}O_2^-$

$2H+ + {}^{\cdot}O_2^- + {}^{\cdot}O_2^- \rightarrow H_2O_2 + O_2$

${}^{\cdot}O_2^- + H_2O \rightarrow H^{\cdot}O_2 + OH^-$

$H^{\cdot}O_2 + H^{\cdot}O_2 \rightarrow OH\cdot + O_2$

$H^{\cdot}O_2 + H_2O_2 \rightarrow H_2O + O_2 + \cdot OH$

$h+ + H_2O/OH^- \rightarrow \cdot OH$

$OH\cdot/\ {}^{\cdot}O_2/h+ + RhB\ boya \rightarrow CO_2 + H_2O$

Görünür ışık ışınımı altında ZnO/CuO kompozitlerinin geniş yüzey alanları ve elektron-delik çifti taşıyıcılarının yeniden birleşmesinin engellenmesi sayesinde %91' lik iyi bir fotokatalitik performans göstedi. Aşağıda ZnO/CuO kompozitinin muhtemel fotokatalitik reaksiyon serisi belirtildi (Hitkari et al., 2022).

$ZnO\ (e^- + h^+)/CuO\ (e^- + h^+) \rightarrow .\ ZnO\ (e^- + e^-)/CuO\ (h^+ + h^+)$

$h^+ + OH^- \rightarrow \bullet OH$

$e^- + O_2{}^- \rightarrow \bullet O_2^-$

$H_2O + \bullet O_2^- \rightarrow \bullet OOH + OH^-$

$2OOH\bullet \rightarrow O_2 + H_2O_2$

$H_2O_2 + \bullet O_2^- \rightarrow \bullet OH + OH^- + O_2$

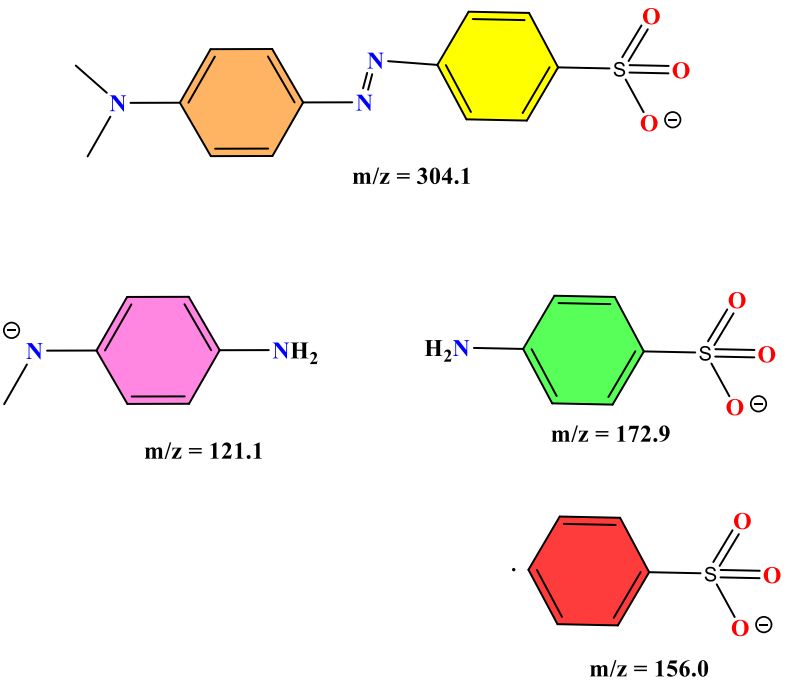
•OH + •O_2 + h^+_{VB} + kirletici maddeler → kirletici maddeyi bozunuma uğratma

•OH + •O_2 + h^+_{VB} + kirletici maddeyi bozunuma uğratma → CO_2 + H_2O

Boyaların Muhtemel Bozunma Sonrasındaki Oluşan Nihai Ürünler

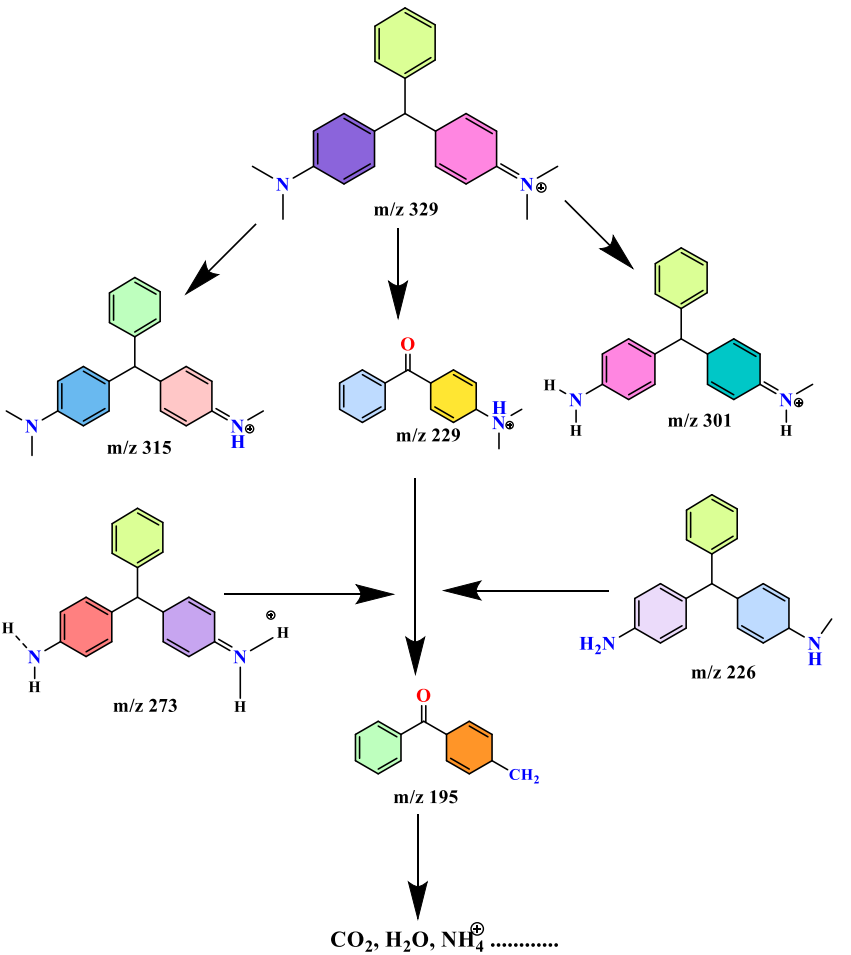
Saf MO çözeltilerinin negatif mod ESI/MS spektrumunda, m/z=304,1 değerindeki pik, MO anyonuna ($[M-H]^-$) karşılık gelir. Sülfanilik asit anyonunu m/z=172,9 değerindeki pik, sülfanilik asitin radikal anyonunu m/z=156,0 değerindeki pik, (Şekil 4) demetilasyonu ise m/z=121,1 değerlerinde belirlendi (Zhong et al., 2018).

Şekil 4 ESI/MS temelinde MO boyar maddesine ait ana ara ürünlerin önerilen yapıları



Mahajan v ear. tarafından 2025 yılında biyojenik olarak sentezlenen ZnO nanopartikülleri tarafından UV ışığına maruz bırakılarak katalize edilen malakit yeşili (MG) boyasının fotokatalitik bozunması, yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi (HR-MS) kullanılarak (Şekil 5) ana ve ara ürünler tesbit edildi (Mahajan et al., 2025).

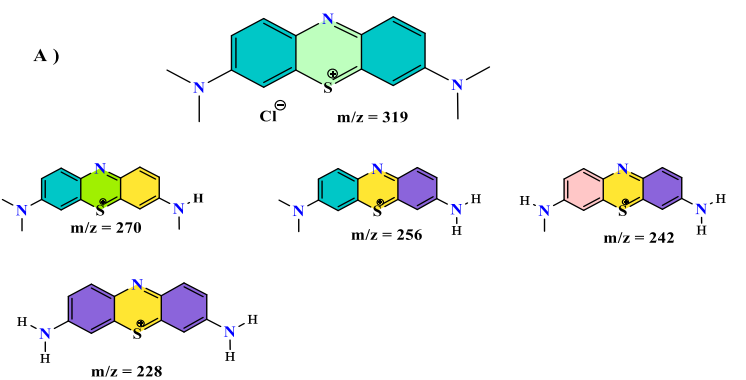
Şekil 5 MG boyasının ZnO NP leri varlığında fotobozunumu sırasında oluşan ara ürünler

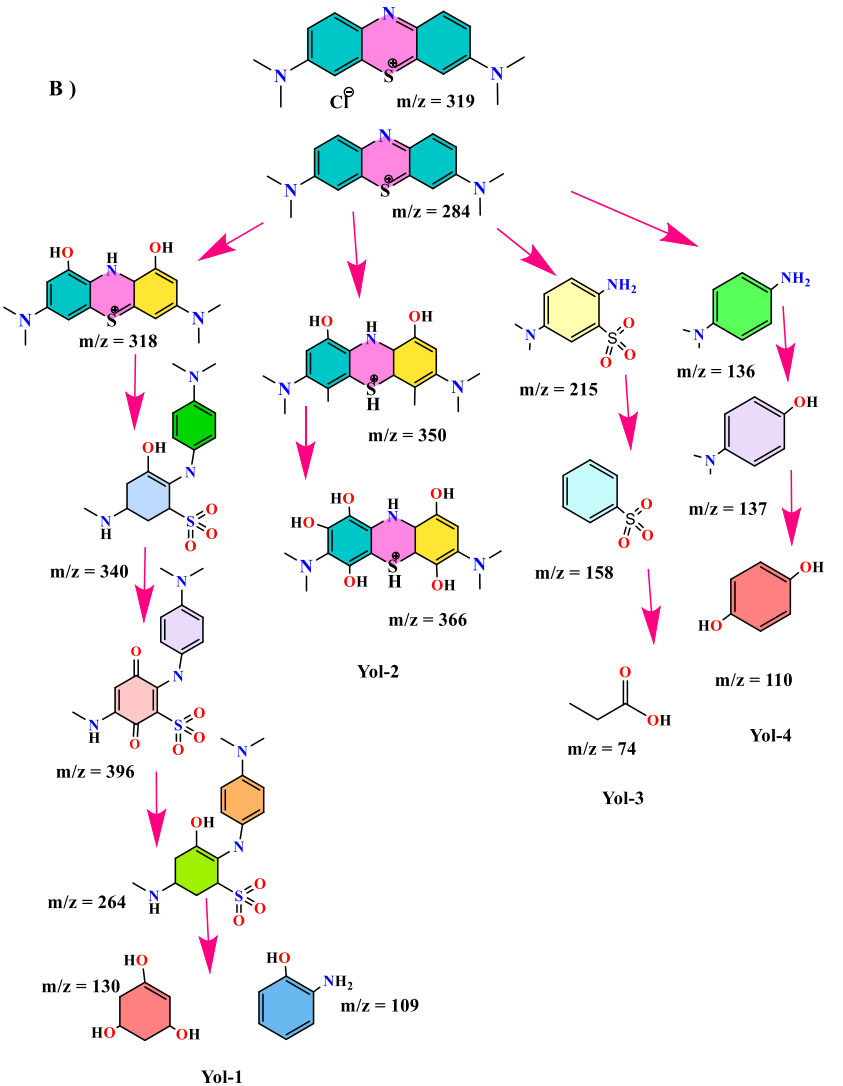


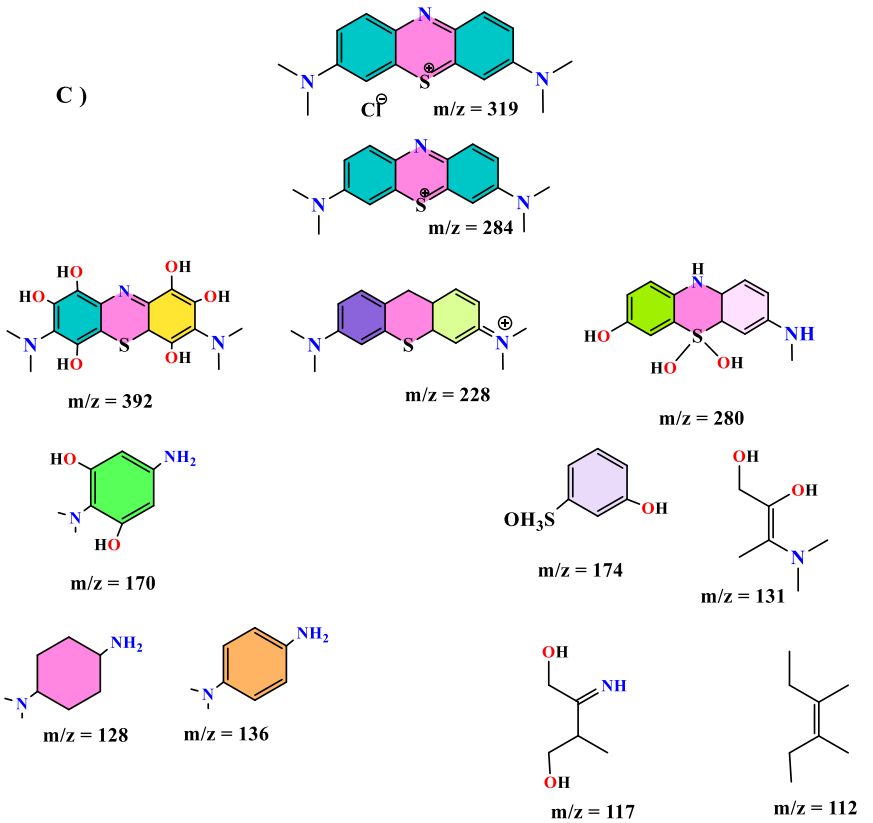
Dulta ve ark. güneş ışığı altında, CuO nanopartiküllerinin fotokatalitik bozunması sonucunda metilen masisinin yapısal formülleri kütle spektrumlarındaki kütle/yük (MS) (Şekil 6 a) oranlarına dayanarak yorumlandı (Dulta et al., 2022). Bansal ve ark. (2025) LC-MS çalışmasıyla ZnO/CQD heteroyapılı nanokompozitlerin kullanımıyla MB' nin bazunma ürünlerini doğruladı ve m/z = 284' te minerelizasyon gerçekleşmeden önceki yapısına görülmektedir. 1. yolda hidroksilasyon ve demetilasyon, 2. yol, hidrodinamik kavitasyon, 3. ve 4. yollarda reaksiyoların devam ederek daha (Şekil 6 b) küçük parçalara ayrıldığı bildirildi (Bansal et al., 2025).

Sahu ve ark. (2026) yılında ZnO/Ag_2O/rGO ZnO/Ag_2O/rGO heteroyapılı katalizör kullanarak karanlık artamda metilen mavisinin bozunması HR-MS analizi ile ara ve nihai ürünler tamınlandı. Bu çalışmanı en önemli özelliği karanlıkta (güneş veya ışık olmadan) MB' nin (Şekil 6 c) bozunmasıdır. Reaksiyonun ilerlemesiyle, ara ürünlerin bir kısmı hidroliz ve oksidasyon süreçleri sonucunda CO_2 ve H_2O'ya dönüşürken, amino ve sülfonik gruplar ise $NO3^-$, $NH4^+$ ve $SO4^{2-}$ iyonlarına yükseltgenir.

Şekil 6 a) CuO nanopartikülü ile MB b) ZnO/CQD nanopartikülü MB'leri ışık ile c) ZnO/Ag2O/rGO ZnO/Ag2O/rGO heteroyapılı katalizör ile karanlıkta bozunumu




B)
m/z = 319
m/z = 284
m/z = 318
m/z = 350
m/z = 215
m/z = 136
m/z = 340
m/z = 366
Yol-2
m/z = 158
m/z = 137
m/z = 396
m/z = 110
Yol-4
m/z = 74
Yol-3
m/z = 264
m/z = 130
m/z = 109
Yol-1

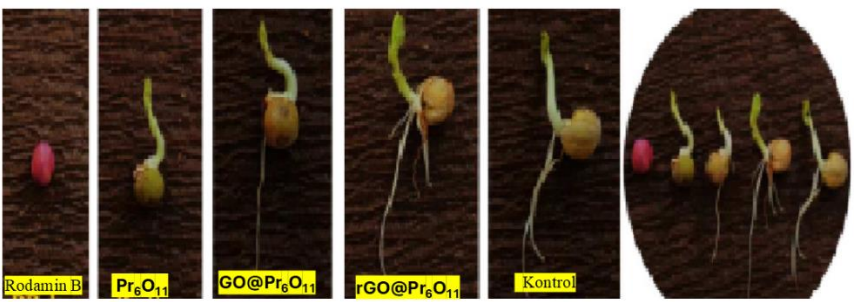


Boyar Maddeler ve İşlem Görmüş Atık Sularda Tohum Çimlenme Testi

Lan ve ark. yaptıkları çalışmada; atık sulardaki toksisitenin belirlenmesi için zehirli maddelere karşı hassasiyetinden dolayı buğday kullanılarak değerlendirdi. Arıtılmamış MB atık suyuna maruz kalan buğdaylarda gelişim ciddi oranda baskılandı; Sonraki aşamalarda; süreye bağlı olarak arıtılmış atık suyun buğdayin çimlenme potansiyeli, kök-gövde gelişimi üzerindeki etkisi baskılanma otradan kalkmasıyla minimum düzeyde kalmış ve kontrol grubundaki buğdaylara benzer sonuçlar vermiştir (Lan et al., 2025).

Rodamin B boyası hem kendi hem de Pr_6O_{11} NP'ler, GO@Pr_6O_{11} NC'ler ve rGO@Pr_6O_{11} NC' ler ile işlem gören atık su bezelye tohumlarının çimlenmesi için kullanıldı. Nanokompozitlerle işlem görmüş boya çözeltilerinden elde edilen su bezelye tohumları 24 saat içinde biyoaktiviteyi koruyarak, güvenli ve verimli tohum çimlenmesini desteklerken saf su ile muamele edilen tohumlar ise yaklaşık 19 saatte çimlendi. İnanılmaz derecede şaşırtıcı olan durum güneş ışığı altında 100 %99,93' lük bozunmaya öncülük eden rGO@Pr_6O_{11} ile işlem görmüş atık su, 10,2 saatte %100' lük çimlenmeyi sağladı. Bu durumun aksi yönde, herhangi bir işlem görmemiş RB boya çözeltisinde bezelye tohumlarında çimlenmenin olmaması, RB çözeltinin toksisitesini ortaya koymaktadır. rGO@Pr_6O_{11} nanokompoziti tohumlarda reaktif oksijen türleri (ROS) oluşturarak çimlenme verimliliğinin artırılmasında önemli rol oynadığı (Şekil 7) varsayılmaktadır (Chakradhar et al., 2025).

Şekil 7 Pr_6O_{11} NP' leri, GO@Pr_6O_{11} NC' leri ve rGO@Pr_6O_{11} NC' leri içeren, RB boyası ve su kullanarak işlem gören RB boyasının bezelye tohumları üzerinde gerçekleştirilen tohum çimlenme testi

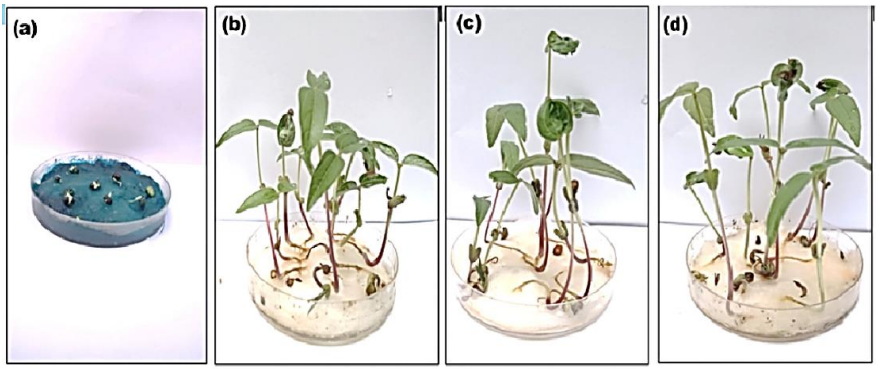


Tatlı mısır tohumları, tohum çimlenme sürecini incelemek amacıyla metilen mavisi çözeltisinde fotokatalizör olarak TiO_2 kullanılmıştır. Her bir çalışma için 20 adet tohum kullanıldı. Deney-1 çimlendirme kağıdı kullanılarak yapıldı ve çimlenen tohum sayısı = 11 ve Deney-2 tohumlar bir elek üzerine yerleştirilerek yapıldı ve çimlenen tohum sayısı = 9 toplam tohum sayısında görüldü (Sawant et al., 2013).

Bizmut katkılı SnS kuantum noktaları (Bi-doped SnS QDs) kontrol çözeltisi, boya içeren çözelti ve işlem görmüş kristal viyole (CV) ve metilen mavisi (MB) çözeltileri maş fasulyesinin çimlenmesini araştırnak için kullanıldı, Sonuç olarak; fotokataliz süreci ilerledikçe çimlenme hızınd bir artış gözlendi. Nihai sonuçlardan; fotokatalitik işleme maruz kalmış CV ve MB çözeltilerindeki maş fasulyesi kontrol grubuna kıyasla hücre içi ROS seviyelerinde önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Fakat fotokataliz işlemine yapılmayan CV ve MB boyalarına maruz kalan maş fasulyesininde oksidatif stresi tetikleyerek ROS seviyelerinde belirgin bir artışa neden olmaktadır (Murugadoss et al., 2025).

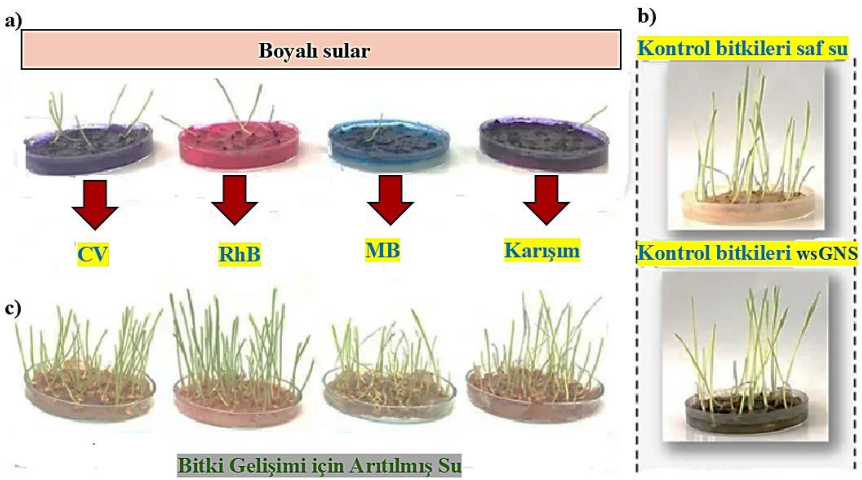
Maş fasulyesi tohumlarının çimlendirilmesi için yapılan analizlerde, MG boya çözeltisinin bitki gelişimini baskıladığı, karşı durumda boya çözeltisinin işlemden geçirilmiş haliyle yetiştirilen maş fasulyesi bitkilerinin, kontrol grubundaki bitkilere oldukça neredeyse aynı düzeyde bir gelişim sergilediği tespit edildi. Şaşırtan bir durum, Czno-noktaları tıpkı saf suda olduğu gibi bitki gelişimini (Şekil 8) destekledi (Sekar & Yadav, 2021).

Şekil 8 MG boyasının maş fasulyesi bitkisinin büyümesi üzerindeki etkisi, 15 günlük çimlenme süresi testi (a) MG boyaları, (b) işlem görmüş boya numunesi, (c) saf su (DDW) ve (d) CZnO-noktaları uygulanmıştır



Toksisiteye çok hassas ve hızlı büyüyen buğdayın gelişimi üzerinde; CV, RhB, MB boyaları ve bunların karışımlarının, wsGNS varlığında fotobozunmaya uğramadan önceki ve sonraki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bozunma öncesindeki CV, RhB, MB boyaları ve bunların karışımlarından oluşan çözeltilerinin, buğday bitkilerinin gelişimini yüksek oranda baskıladığı görüldü. Bunun tam tersi durumunda, fotobozunma işleminden geçmiş atık suyla yetiştirilen buğdayların, kontrol grubundaki bitkilerle benzer şekilde (Şekil 9) gelişim gösterdiği tespit edildi (Gunture et al., 2019).

Şekil 9 Boya maddelerinin, bunların karışımlarının ve arıtılmış atık suyun buğday bitkileri üzerindeki etkisi, 15 günlük çimlenme süresi boyunca test edildi; (a) boya içeren su ve boya karışımları (CV + RhB + MB); (b) kontrol grubu (saf su ve wsGNS çözeltisi ile); ve (c) boya maddeleri ile bunların karışımlarını içeren arıtılmış atık su uygulandı



Sonuçlar

Kirlenmiş sular, ekosistem üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır; bu durum, suyun kalitesi halk sağlığını ve doğal sistemleri etkileyen son derece kritik bir meseledir, tehlikeli boya atıklarının yol açtığı zararı gidermek için sürdürülebilir ve uygun bir atık su arıtma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, boyaların su ortamından uzaklaştırılması için etkili bir yöntemin uygulanması gerekmektedir. Günümüzde, katalizörlerin geri dönüştürülebilirliği ve yeniden kullanılabilirliği kataliz alanında önemli bir konudur çünkü çok sayıda katalizör ilk veya ikinci döngüden sonra etkisini kaybeder ve kullanılmadan atılması firmalarda mali zarara neden olur.

Fotokatalitik boya bozunumu için sulu ortamın en etkili pH değeri, fotokatalistin sıfır yük noktası (pHpzc) üzerinden belirlenebilir. Sulu boya ortamının pH değeri, fotokatalistin yüzeyi pozitif yük kazanır; bunun tersi durumda ise yüzey negatif yüklenir. PZC'den daha yüksek pH değerlerinde, anyonik boya ile aynı yüke sahip fotokatalizör arasındaki iyon-iyon itme kuvveti nedeniyle, boyanın adsorpsiyonu azalır; karşı bir durum olarak pczden daha düşük bir Ph değerinde ise katyonik bir boya molekülünde katyonların birbirini itmelerinden dolayı daha az fotodegradasyona uğramasına yol açar. Bu durum bize fotokatalitin yükünün ve uygun boyanın seçilmesindeki rölünün önemini vurgulamaktadır. Su ortamlarında bulunan farklı boya kirleticilerinin uzaklaştırılması için etkili fotokatalizörler kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

Bu derleme çalışmasında, sürdürülebilir su güvenliği ve atık su arıtma için gelecekteki araştırmalara odak noktaları sunmaktadır. Son yıllarda sürdürülebilir tarımda işlem görmüş atık suların kullanımına dair çalışmalar hız kazanmaktadır ve bu derlemenin yapılaçak çalışmalara ışık tutması öngörülmektedir.

Kaynakça

Adday, A. S., & Al-Jubouri, S. M. (2024). Photocatalytic oxidative removal of the organic pollutant from wastewater using recyclable Ag2O@ CRA heterojunction photocatalyst. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100852.

Afzal, M. Y., Bilal, M., Asif, M., Rehman, S., Hussain, J., Liu, Q., ... & Shaikh, A. J. (2026). Dynamic light scattering-assisted design of an optimized NiS–ZnS nanocomposite for efficient photocatalytic dye degradation: experimental and theoretical insights. *RSC advances,* 16(26), 23500-23527.

Ahmad, N., Khan, M. R., Velu, K. S., & Mohandoss, S. (2025). Development of FeMnO3@ Ag perovskite via sol-gel combustion for superior photocatalytic degradation of methyl orange under visible light irradiation. *Materials Chemistry and Physics*, 340, 130819.

Akbar, R., Shahzad, R., Munir, M. A., Saleem, S., Timoumi, A., Khalid, A., ... & Almukhlifi, H. A. (2026). Investigating the sintering effects on the photo-degradation efficiency of CuMnFe2O4@ AC heterostructure against malachite green dye for wastewater treatments. *Optical Materials*, 118077.

Alamaw, W., Taddesse, A. M., Adgo, A., Bezu, Z., & Teju, E. (2025). Synthesis and characterization of zeolite-supported CdS/TiO2/Ag2CO3 ternary composite for Photodegradation of methyl Orange. *Results in Chemistry*, 14, 102063.

Al-Farraj, E. S., & Abdelrahman, E. A. (2024). Efficient photocatalytic degradation of congo red dye using facilely synthesized and characterized MgAl2O4 nanoparticles. *ACS omega*, 9(4), 4870.

Alomayrah, N., Ikram, M., Alomairy, S., Al-Buriahi, M. S., Khan, M. N., Warsi, M. F., & Irshad, A. (2024). Fabrication of CuO/MoS2@ gCN nanocomposite for effective degradation of methyl orange and phenol photocatalytically. *Results in Physics,* 64, 107902.

Alsulmi, A., Afifi, S. A., Gad, A. A., Abdel-Messih, M. F., Sultan, A., & Ahmed, M. A. (2026). Fine Tuning of Ag3PO4/g-C3N4 Hybrid Nanostructure Catalyst for Natural Sunlight-Assisted Cationic Dye Neutralization. *Catalysts*, 16(8), 731.

Altun, T., Acar, M. K., & Gubbuk, I. H. (2025). Preparation and Characterization of the MMT@ Fe3O4@ Ag Nanocomposite for Catalytic Degradation of Methyl Yellow: Reaction Parameters and Mechanism Based on the Artificial Neuron Network. *ACS omega*, 10(1), 134-146.

Alvez-Tovar, B., Scalize, P. S., Angiolillo-Rodríguez, G., Albuquerque, A., Ebang, M. N., & de Oliveira, T. F. (2025). Agro-industrial waste upcycling into activated carbons: A sustainable approach for dye removal and wastewater treatment. *Sustainability,* 17(5), 2036.

Alzahrani, S. O., Alqarni, S. A., Alessa, H., Ashour, G. R., Jawhari, A. H., Hameed, A., ... & El-Metwaly, N. M. (2025). Electrospun nanofibers membrane of carbon quantum dots loaded onto chitosan-polyvinyl alcohol for removal of rhodamine B dye from aqueous solutions: Adsorption isotherm, kinetics, thermodynamics and optimization via Box-Behnken design. *International Journal of Biological Macromolecules*, 304, 140951.

Anand, S., & Sunajadevi, K. R. (2024). Optimizing malachite green adsorption with Co-PTC metal organic framework: Insights into mechanisms and performance. *Journal of Molecular Structure*, 1318, 139256.

Asim, J., Afzal, M. Y., Rehman, S., Shaikh, A. J., Ahmad, F., Amin, M. T., ... & Bilal, M. (2026). Fish-scale-derived carbon quantum dots coupled with ZnO/Co3O4 for adsorption-assisted visible-light decolorization of reactive black 5. *RSC advances,* 16(41), 48850-48868.

Bansal, H., Sethi, P., & Basu, S. (2025). Nanoflower-like ZnO–carbon quantum dot heterostructures for solar-driven degradation of methylene blue: a high-performance and recyclable photocatalyst for sustainable wastewater treatment. *Materials Advances*, 6(20), 7585-7598.

Bansal, H., Sethi, P., & Basu, S. (2025). Nanoflower-like ZnO–carbon quantum dot heterostructures for solar-driven degradation of methylene blue: a high-performance and recyclable photocatalyst for sustainable wastewater treatment. *Materials Advances,* 6(20), 7585-7598.

Beegum, K. B., Ganesh, S., Sabu, C., Varghese, A. S., AS, A., Thomas, C., ... & Raman, R. (2024). Purification of textile wastewater by collective degradation using nanorods of cesium titanium bromide (CsTiBr3) perovskite. *Surfaces and Interfaces*, 55, 105358.

Bekele, E. A., Korsa, H. A., Desalegn, Y. M., & Bekele, G. G. (2025). Optimization of binary ZnO/rGO nanocomposite for enhanced photocatalytic degradation of rhodamine B dye using response surface methodology. *Journal of Alloys and Compounds*, 183779.

Boonserm, K., Charoenchit, P., Sutcha, A., Jutimoosik, J., & Phinjaroenphan, R. (2026). Synergistic effect of CuO@ NiO@ Fe2O3 heterostructure on photocatalytic efficiency and cyclic stability in wastewater treatment. *Journal of Nanoparticle Research*, 28(9), 220.

Busharat, M. A., Shukrullah, S., Ibrahim, A. A., Naz, M. Y., Iqbal, M., Khan, Y., & Shoaib, M. (2024). Effect of Nonthermal plasma on cation distribution and photocatalytic activity of MgFe2O4 nanoparticles for Dye Degradation Application. *International Journal of Chemical Engineering*, 2024(1), 8059559.

Cabrera, A. F., Torres, C. E. R., de la Presa, P., & Stewart, S. J. (2026). Magnetically recoverable $MgFe_2O_4$ nanoparticles as efficient catalysts for rapid dye degradation in water. *Environmental Science and Pollution Research,* 1-14.

Chakradhar, S. P., Krushna, B. R., Manjunatha, K., Yu, S. L., Yu, Y. T., Wu, S. Y., & Nagabhushana, H. (2025). Green synthesized rGO@ Pr_6O_{11} nanocomposites: Efficient photocatalytic degradation of rhodamine B and enhanced energy storage performance. *Journal of Energy Storage*, 128, 117205.

Chen, C., Yan, Z., Ma, Z., Ma, D., Xing, S., Li, W., ... & Han, Q. (2025). Magnetic Fe3O4 nanoparticles supported on carbonized corncob as heterogeneous Fenton catalyst for efficient degradation of methyl orange. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 77, 144-155.

Chufa, B. M., Gonfa, B. A., & Anshebo, T. Y. (2021). Enhanced photocatalytic activity of reduced graphene oxide/bismuth sulfide nanostructure composites for the degradation of methylene blue. *Journal of Nanomaterials,* 2021(1), 1309961.

Divakara, S. G., Mahesh, B., Jayanna, B. K., & Anil Kumar, H. G. (2025). Photocatalytic degradation of crystal violet dye using honey mediated synthesis of NiFe2O4 nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 18(1), 2543931.

Dulta, K., Koşarsoy Ağçeli, G., Chauhan, P., Jasrotia, R., Chauhan, P. K., & Ighalo, J. O. (2022). Multifunctional CuO nanoparticles

with enhanced photocatalytic dye degradation and antibacterial activity. *Sustainable Environment Research*, 32(1), 2.

Elbadawy, H. A., Elhusseiny, A. F., Hussein, S. M., & Sadik, W. A. (2023). Sustainable and energy-efficient photocatalytic degradation of textile dye assisted by ecofriendly synthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports,* 13(1), 2302.

El-Mas, S. M., Hassaan, M. A., El-Subruiti, G. M., Eltaweil, A. S., & El Nemr, A. (2025). Microwave-induced degradation of Congo red dye in the presence of 2D Ti3C2Tx MXene as a catalyst. *Scientific Reports,* 15(1), 634.

Fadhil, D. H., Al-Mashhadani, M. H., Mortada, W. I., Alsayed, R., & Khalifa, M. E. (2026). Eco-derived chitosan–cellulose hybrid from pomegranate Peel for enhanced uptake of methyl Orange dye. *Results in Chemistry*, 103371.

Fang, D., Li, X., Chi, S., Dang, J., An, X., Jin, T., & Wang, J. (2025). Construction of a novel surface plasmon resonance enhanced Z-scheme Cu| CuBi2O4/Bi/Bi2O3 photocatalyst film for effective organic pollutant degradation and simultaneous hydrogen evolution. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 191, 109374.

Fatima, S., Ali, S. I., Iqbal, M. Z., & Rizwan, S. (2020). Congo red dye degradation by graphene nanoplatelets/doped bismuth ferrite nanoparticle hybrid catalysts under dark and light conditions. *Catalysts*, 10(4), 367.

Foroushani, M. M. Z., Dinari, M., Farahmand, S., & Ghiaci, M. (2025). Impregnation-synthesized ZnO/CuO hybrid for high-efficiency methylene blue degradation in wastewater treatment application. *Results in Engineering,* 106884.

Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Boffito, D. C., & Ramavandi, B. (2022). Sono-photocatalytic activity of cloisite 30B/ZnO/Ag2O

nanocomposite for the simultaneous degradation of crystal violet and methylene blue dyes in aqueous media. *Nanomaterials,* 12(18), 3103.

Goudjil, M. B., Dali, H., Zighmi, S., Mahcene, Z., & Bencheikh, S. E. (2024). Photocatalytic degradation of methylene blue dye with biosynthesized Hematite α-Fe2O3 nanoparticles under UV-Irradiation. *Desalination and water treatment*, 317, 100079.

Gunture, Singh, A., Bhati, A., Khare, P., Tripathi, K. M., & Sonkar, S. K. (2019). Soluble graphene nanosheets for the sunlight-induced photodegradation of the mixture of dyes and its environmental assessment. *Scientific reports,* 9(1), 2522.

Hieu, V. Q., Phung, T. K., Nguyen, T. Q., Khan, A., Doan, V. D., Tran, V. A., & Le, V. T. (2021). Photocatalytic degradation of methyl orange dye by Ti3C2–TiO2 heterojunction under solar light. *Chemosphere*, 276, 130154.

Hitkari, G., Chowdhary, P., Kumar, V., Singh, S., & Motghare, A. (2022). Potential of Copper-Zinc Oxide nanocomposite for photocatalytic degradation of congo red dye. *Cleaner Chemical Engineering,* 1, 100003.

Husain, A., Ali, A., Alqarni, S. A., Ansari, K., Danish, M., Gunnasegaran, P., ... & Kang, K. T. (2025). Recycling waste for energy: Reusing methyl orange dye-adsorbed polythiophene/Fe3O4 nanorods/reduced graphene oxide nanocomposite as a supercapacitor electrode. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices,* 10(2), 100865.

Ibrahem, H., Gomaa, H., Gahlan, A. A., & Nagiub, A. M. (2026). Sustainable synthesis of Ag/UiO-66 composites using recycled silver for efficient adsorption of methylene blue and crystal violet. *Scientific Reports*, 16(1), 24904.

Kabadayi, O., Altintig, E., & Ballai, G. (2024). Zeolite supported zinc oxide nanoparticles composite: Synthesis, characterization, and photocatalytic activity for methylene blue dye degradation. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100433.

Kalaycıoğlu, Z., Özuğur Uysal, B., Pekcan, O., & Erim, F. B. (2023). Efficient photocatalytic degradation of methylene blue dye from aqueous solution with cerium oxide nanoparticles and graphene oxide-doped polyacrylamide. *ACS omega*, 8(14), 13004-13015.

Kenda, G. T., Fotsop, C. G., Tchuifon, D. R. T., Kouteu, P. A. N., Fanle, T. F., & Anagho, S. G. (2024). Building TiO2-doped magnetic biochars from Citrus sinensis peels as low-cost materials for improved dye degradation using a mathematical approach. *Applied Surface Science Advances, 19*, 100554.

Khalaji, A. D. (2024). NiFe2O4 prepared by the chitosan-assisted route for the photodegradation of methylene blue under simulated sun light irradiation. *Chemical Physics Impact*, 8, 100652.

Khatun, M., Mitra, P., & Mukherjee, S. (2023). Effect of band gap and particle size on photocatalytic degradation of NiSnO3 nanopowder for some conventional organic dyes. *Hybrid Advances,* 4, 100079.

Kitchamsetti, N., Chakra, C. S., De Barros, A. L. F., & Kim, D. (2023). Development of MOF based recyclable photocatalyst for the removal of different organic dye pollutants. *Nanomaterials,* 13(2), 336.

Kumar, S. A., Jarvin, M., Inbanathan, S. S. R., Umar, A., Lalla, N. P., Dzade, N. Y., ... & Baskoutas, S. (2022). Facile green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using tea (Camellia sinensis) extract for efficient photocatalytic degradation of methylene blue dye. *Environmental Technology & Innovation,* 28, 102746.

Lan, X., Chu, Z., Zhou, J., Wang, G., & Zhu, M. (2025). Electrochemical efficient degradation of methylene blue (MB) by two-step electrodeposited Ti/TiO2-NTs/β-PbO2 electrode: Performance, degradation mechanism, and toxicity study of intermediate products. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 307, 119419.

Langa, C., Mabuba, N., Ndlovu, S., Motaung, D. E., & Hintsho-Mbita, N. C. (2026). Green-synthesised Ce-doped NiS/carbon sphere nanocomposites for enhanced photocatalytic degradation of Congo red dye: Structural, surface, and mechanistic insights. *Next Nanotechnology,* 10, 100672.

Li, X. Y., Yao, Z. F., Zhang, L. Y., Zheng, G. H., Dai, Z. X., & Chen, K. Y. (2019). Generation of oxygen vacancies on Sr2FeMoO6 to improve its photocatalytic performance through a novel preparation method involving pH adjustment and use of surfactant. *Applied Surface Science,* 480, 262-275.

Liang, P., Yang, W., Peng, H., & Zhao, S. (2024). Efficient degradation of methylene blue in industrial wastewater and high cycling stability of nano ZnO. *Molecules,* 29(23), 5584.

Lin, X., Chen, Y., Zhou, D., Chen, M., Liang, W., & Guo, H. (2024). Aminated graphene quantum dots/CdS nanobelts for enhanced photocatalytic degradation of RhB dye under visible light. *RSC advances,* 14(1), 255-265.

Luan, J., & Liu, B. (2026). Synthesis and Property Detection of the Ho2BiNbO7/ZnBiTmO4 Composite Catalyst for Photocatalytic Degradation of Brilliant Green. *Nanomaterials*, 16(15), 951.

Madaan, V., Kumar, A., Bhankar, V., Singh, P., Kumari, P., & Kumar, K. (2025). Room temperature ferromagnetism and photocatalytic

performance of Neodymium (III)-doped Ceria NPs for rose bengal dye degradation. *Materials Today Communications,* 45, 112259.

Mahajan, M., Kumar, S., Gaur, J., Kaushal, S., Dalal, J., Singh, G., ... & Ahlawat, D. S. (2025). Green synthesis of ZnO nanoparticles using Justicia adhatoda for photocatalytic degradation of malachite green and reduction of 4-nitrophenol. *RSC advances,* 15(4), 2958-2980.

Mandal, S. K., Paul, S., Datta, S., & Jana, D. (2021). Nitrogenated CQD decorated ZnO nanorods towards rapid photodegradation of rhodamine B: A combined experimental and theoretical approach. *Applied Surface Science,* 563, 150315.

Mandal, S. K., Paul, S., Datta, S., & Jana, D. (2021). Nitrogenated CQD decorated ZnO nanorods towards rapid photodegradation of rhodamine B: A combined experimental and theoretical approach. *Applied Surface Science*, 563, 150315.

Meena, P., Banshiwal, P. J., Chandra, S., Kumar, S., Gora, M. K., Meena, P. L., & Kumar, A. (2026). Study of the Structural, Photocatalytic, and Magnetic Properties of Gd3+-Engineered Co0. 5Mg0. 5Fe2-xGdxO4 Ferrite Nanoparticles. *Catalysis Surveys from Asia,* 1-19.

Moghanlou, A. S., Molaei, M., & Fang, T. (2025). A new powerful magnetic dark catalyst based on rGO/Fe3O4/CdSe nanocomposite for ultrafast degradation of methylene blue dye. *Journal of Fluorescence,* 35(7), 5847-5859.

Mohamed, F., Hassaballa, S., Shaban, M., & Ahmed, A. M. (2022). Highly efficient photocatalyst fabricated from the chemical recycling of iron waste and natural zeolite for super dye degradation. *Nanomaterials,* 12(2), 235.

Moosavi, S., Li, R. Y. M., Lai, C. W., Yusof, Y., Gan, S., Akbarzadeh, O., ... & Johan, M. R. (2020). Methylene blue dye photocatalytic degradation over synthesised Fe3O4/AC/TiO2 nano-catalyst: degradation and reusability studies. *Nanomaterials,* 10(12), 2360.

Moosavi, S., Li, R. Y. M., Lai, C. W., Yusof, Y., Gan, S., Akbarzadeh, O., ... & Johan, M. R. (2020). Methylene blue dye photocatalytic degradation over synthesised Fe3O4/AC/TiO2 nano-catalyst: degradation and reusability studies. *Nanomaterials,* 10(12), 2360.

Murugadoss, G., Venkatesh, N., Pandurengan, S., Thiruppathi, G., Sundararaj, P., & Gnanasekaran, L. (2025). Photocatalytic degradation using Bi-doped SnS Quantum dots and phytotoxicity evaluation of treated effluents through seed germination. *Chemical Physics Impact,* 100944.

Nassar, M. Y., NourEldien, M. S., Ibrahim, I. M., & Aly, H. M. (2023). A facile hydrothermal synthesis of S-VO2-cellulose nanocomposite for photocatalytic degradation of methylene blue dye. *Processes,* 11(5), 1322.

Nonthing, S., Panchakeaw, A., Dulyasucharit, R., Nakajima, H., & Nanan, S. (2025). Fe3O4/BiOCl photocatalyst with magnetic recovery property for solar-light-responsive removal of Rhodamine B dye. *OpenNano,* 100260.

Qi, C., Chen, H., Xu, C., Xu, Z., Chen, H., Yang, S., ... & Sun, C. (2020). Synthesis and application of magnetic materials-barium ferrite nanomaterial as an effective microwave catalyst for degradation of brilliant green. *Chemosphere,* 260, 127681.

Qu, J., Liu, X., Zhao, Y., & Ren, Y. (2026). Synthesis of flower-like Bi2WO6/NiO composites by hydrothermal method for highly efficient photocatalytic degradation of RhB. *Inorganic Chemistry Communications*, 117515.

Rajendran, S., Harikaran, D., & R, V. (2026). A 24/7 perovskite catalyst through oxygen vacancy engineering for the rapid catalytic degradation of azo dyes under dark and ambient light conditions. *Materials Advances,* 7(4), 2012-2016.

Sahu, P., & Das, D. (2026). Dark degradation of methylene blue dye by ZnO/Ag2O/rGO heterostructure reactant catalyst. *Next Materials,* 13, 103435.

Saqib, M., Shafiq, F., Qiao, W., Shah, F., & Khan, A. M. (2026). Interfacial engineering of Mn-ZnO/g-C3N4 heterostructure for selective mixed dye degradation under visible light. *Journal of Alloys and Compounds,* 187156.

Sawant, S. A., Nene, A., Somani, S. P., Omanwar, S. K., & Somani, P. R. (2013). Simultaneous waste water purification via photocatalysis and seed germination. *Green and Sustainable Chemistry,* 3(3), 129-133.

Sekar, A., & Yadav, R. (2021). Green fabrication of zinc oxide supported carbon dots for visible light-responsive photocatalytic decolourization of Malachite Green dye: Optimization and kinetic studies. *Optik,* 242, 167311.

Serouti, A., Eddine, L. S., Meneceur, S., Hasan, G. G., Mohammed, H. A., Salmi, C., ... & Abdullah, J. A. A. (2024). Biogenic ZnO/CuO/Fe2O3 nanocomposite: a groundbreaking approach for enhanced degradation capabilities and reusability in dye removal applications. *Arabian Journal for Science and Engineering,* 49(1), 753-764.

Shaban, M., Elwahab, F. A., Ghitas, A. E., & El Zayat, M. Y. (2020). Efficient and recyclable photocatalytic degradation of methylene blue dye in aqueous solutions using nanostructured Cd1− x Co x S

films of different doping levels. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 95(2), 276-288.

Shah, K., Sahito, O. M., Ali, S., Buledi, J. A., & Tuzen, M. (2026). Sustainable MgO-biochar nanointerface derived from ziziphus mauritiana for enhanced Congo red photodegradation. *RSC advances,* 16(39), 44883-44897.

Shimi, A. K., Ahmed, H. M., Wahab, M., Katheria, S., Wabaidur, S. M., Eldesoky, G. E., ... & Rane, K. P. (2022). Synthesis and applications of green synthesized TiO2 nanoparticles for photocatalytic dye degradation and antibacterial activity. *Journal of Nanomaterials,* 2022(1), 7060388.

Shkir, M., Khan, F. S., & Alshahrani, T. (2025). Biosynthesis of CuO nanoparticles using Caralluma adscendens leaf extract for developed antibacterial and photocatalytic dye degradation properties. *Materials Chemistry and Physics,* 344, 131118.

Shyagathur, S. C., Hiremath, A., Pattar, J., & Rao, H. A. (2025). Visible light harvesting using ZnS/rGO/g-C3N4 heterojunction for crystal violet dye degradation: kinetic and mechanistic insights. *Ceramics International.*

Singh, P., Rani, N., Madaan, V., Kumar, S., Bhankar, V., Kumar, P., & Kumar, K. (2025). Assessment of biomass derived NC-dots decoration on photocatalytic efficiency of Sg-C3N4/g-C3N4 homojunction. *Materials Chemistry and Physics*, 339, 130707.

Tian, C., Zhang, H., Chen, P., Song, Y., & Zhang, J. (2022). Magnetically recyclable wool/Fe3O4@ TiO2/UiO-66 core-shell structured composite for photocatalytic removal of methylene blue, congo red, tetracycline hydrochloride and Cr (VI) ions. *Fibers and Polymers,* 23(10), 2780-2797.

Verma, N., Chundawat, T. S., Chandra, H., & Vaya, D. (2023). An efficient time reductive photocatalytic degradation of carcinogenic dyes by TiO2-GO nanocomposite. *Materials Research Bulletin,* 158, 112043.

Wang, X., Ge, X., Liu, X., Song, X., & Xu, X. (2019). Enhanced degradation performance of organic dye over the reduced double perovskite compound Sr2CaWO6 under visible light irradiation. *Materials Research Express*, 6(8), 085529.

Weldekirstos, H. D., Mengist, T., Belachew, N., & Mekonnen, M. L. (2024). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue dye using fascily synthesized g-C3N4/CoFe2O4 composite under sun light irradiation. *Results in Chemistry,* 7, 101306.

Yifira, M. T., Gebreslassie, G., Mersha, A. K., & Mekonnen, K. N. (2025). Cellulose nanofiber-scaffolded rGO/WO3 membrane for photocatalytic degradation of methylene blue under visible light irradiation. *RSC advances,* 15(28), 22649-22660.

Zhang, X., Chen, W., & Li, X. (2024). Efficiently recyclable Fe-doped ZnO/bacterial cellulose-based composite aerogel for photocatalytic degradation of methylene blue under visible light. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(9), 4315-4329.

Zhong, W., Jiang, T., Dang, Y., He, J., Chen, S. Y., Kuo, C. H., ... & Suib, S. L. (2018). Mechanism studies on methyl orange dye degradation by perovskite-type LaNiO3-δ under dark ambient conditions. *Applied Catalysis A: General,* 549, 302-309.

BÖLÜM 5

DİKEY TARIMDA KAYNAK VERİMLİLİĞİ: AYDINLATMA, İKLİMLENDİRME VE HİDROPONİK YÖNETİMİN BÜTÜNLEŞİK OPTİMİZASYONU

Sefa ALTIKAT[1]

1GİRİŞ

Dikey tarım, yapay aydınlatma altında çok katlı, yalıtılmış kapalı hacimlerde üretim yapılmasıdır. Kapalı bitki üretim sistemi; yetiştirme raflarını, aydınlatmayı, iklimlendirmeyi, CO_2 beslemesini, besin çözeltisi dağıtımını ve çevre kontrolünü bir araya getirir (Kozai, 2013). Dış iklim etkileri azaltılabilse de elektrik ve malzeme girdileri sürer; dolayısıyla üretim ortamının kararlılığı, kaynak bütçesinin etkin yönetilmesine bağlıdır.

Kapalı devre hidroponik üretimde drenajın yeniden kullanılması ve transpirasyon suyunun yoğuşturularak geri kazanılması su tüketimini azaltır. Belirli karşılaştırmalarda seraya göre %95'e varan su tasarrufu bildirilmiştir {GerreweyT21}. Çok katlı yerleşim taban alanı başına üretimi artırırken (Pennisi et al., 2019), yapay aydınlatma ve iklimlendirme yüksek elektrik talebi

1[Prof.Dr/ Iğdır Üniversitesi / Biyosistem Mühendiliği / ORCID: 0000-0002-3472-4424]

yaratır. Bu kazanım ve maliyetler aynı sistem sınırı içinde değerlendirilmelidir.

Toplam elektrik tüketimi ile enerji kullanım etkinliği farklı göstergelerdir. İlki belirli dönemde harcanan enerjiyi, ikincisi birim enerji başına pazarlanabilir ürün miktarını gösterir. Işığı azaltmak tüketimi düşürse de üretim çevrimini uzatarak ürün başına enerji gereksinimini artırabilir. Bu nedenle yönetim kararları toplam tüketim, özgül tüketim ve pazarlanabilir verim birlikte izlenerek verilmelidir.

Bölüm, yapay aydınlatmalı kapalı sistemlerde aydınlatma, iklimlendirme ve hidroponik yönetimin etkileşimlerini literatür üzerinden değerlendirmektedir. Yapraklı sebzeler temel örnektir; sera bulgularının dikey tarıma, bir türdeki sonuçların diğer türlere aktarılması koşullara bağlıdır. Çalışma deneysel araştırma değil, bütünleşik optimizasyon için kavramsal bir sentezdir.

2. DİKEY TARIMDA KAYNAK AKIŞLARI VE PERFORMANS GÖSTERGELERİ

Bütünleşik optimizasyonun ön koşulu, sistemin sınırlarının ve bu sınırlardan geçen akışların tanımlanmasıdır. Bir dikey tarım tesisinin sistem sınırı, çok katlı yetiştirme hacmini, iklimlendirme ve havalandırma ekipmanını, aydınlatma armatürlerini, besin çözeltisi hazırlama ve dağıtım birimini ve bunları yöneten kontrol altyapısını kapsar. Bu sınırın dışında kalan elektrik üretimi, gübre üretimi ve paketleme gibi süreçler, yaşam döngüsü değerlendirmesinde ayrıca ele alınır ve sonuçları doğrudan etkiler; bu nedenle sistem sınırının nerede çizildiği, elde edilen performans göstergelerinin yorumunu belirler.

Temel girdiler elektrik, su, CO_2 ve besin maddeleridir. Çıktılar pazarlanabilir ürün, bitki artıkları, tahliye çözeltisi, atık ısı ve CO_2 kaçaklarıdır. Drenaj ve yoğuşma suyunun yeniden kullanımı

sistem içi döngüler oluşturur. Şekil 1, bu akışları ve geri kazanım hatlarını göstermektedir.

Bir ticari tesis analizinde elektrik talebinin yaklaşık %65'i LED aydınlatmadan, %20'si hava koşullandırmadan, %10'u nem almadan ve %5'i kontrol ve güvenlikten kaynaklanmıştır (Arabzadeh et al., 2022). Bu dağılım tesise özgüdür. LED girdisinin biyokütlede tutulmayan bölümü sonunda ısıya dönüşür; aydınlatma, soğutma ve nem alma birlikte değerlendirilmelidir (Blom et al., 2023).

Performans göstergelerinde taze ve kuru kütle temeli ayrılmalıdır. Taze kütle ekonomik değerlendirmeye, kuru kütle fizyolojik karşılaştırmaya uygundur; aralarındaki dönüşüm ürünün kuru madde oranına bağlıdır (Pennisi et al., 2025). Alan başına üretim, ürün başına tüketim ve bitkide tutulan kaynağın girdiye oranı farklı kavramlardır. Çizelge 1, temel göstergeleri ve karşılaştırma sınırlarını özetlemektedir.

Marul üretimi için derlenen özgül enerji tüketimi yaklaşık 10–18 kWh kg^{-1}, ekipman iyileştirmelerine dayalı teknik hedef ise 3,1–7,4 kWh kg^{-1} düzeyindedir (Miserocchi & Franco, 2024). Enerji kullanım etkinliği bunun tersidir ve kg taze ürün kWh^{-1} ile ifade edilir. Teknik hedefler gerçekleşmiş ticari sonuçlar olarak sunulmamalı; yetiştirme dönemi, tesis sınırı ve ürün kayıpları raporlanmalıdır.

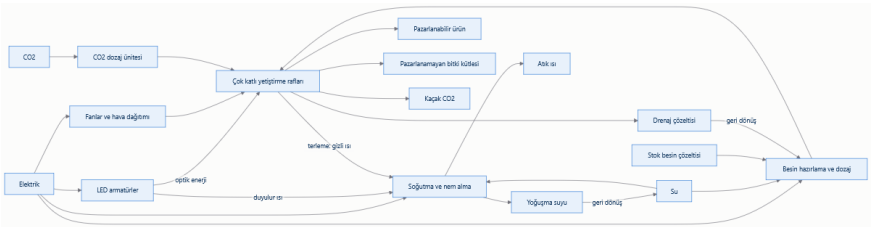
Çizelge 1. Kaynak verimliliği göstergeleri: tanım, hesaplama yaklaşımı, birim ve yorumlama sınırı

Gösterge	Hesaplama	Birim	Yorumlama sınırı
Özgül enerji tüketimi	Toplam enerji / pazarlanabilir ürün	kWh kg^{-1}	Taze/kuru kütle ve dönem belirtilir.
Enerji kullanım etkinliği	Pazarlanabilir ürün / enerji	kg kWh^{-1}	Özgül tüketimin tersidir.

Gösterge	Hesaplama	Birim	Yorumlama sınırı
Su kullanım etkinliği	Ürün / toplam su girdisi	g L^{-1}	Sulama, HVAC ve yıkama kapsamı açıklanır.
Kaynak tutma oranı	Bitkide tutulan / verilen kaynak	–	Ürün/su oranından farklıdır.
Foton etkinliği	Foton akısı / elektriksel güç	µmol J^{-1}	Armatür özelliğidir; kanopi dağılımını göstermez.
COP	Uzaklaştırılan ısı / elektrik	–	Çalışma koşullarıyla değişir.

Kaynak: Çizelgedeki göstergeler ve sayısal değerler, metinde ilgili yerlerde atıf verilen çalışmalardan derlenmiştir. Değerler farklı sistem sınırları ve kütle temellerinden türetildiği için doğrudan karşılaştırılmamalıdır.

Şekil 1. Çok katlı kapalı bir üretim sisteminde enerji, su, CO_2 ve besin maddesi akışlarının şematik gösterimi



Kaynak: Akış yapısı, kaynak dağılımı ve ısı yükü verileri temel alınarak bu bölüm için özgün olarak çizilmiştir. Kesikli çerçeve sistem sınırını, farklı çizgi tipi geri kazanım hatlarını gösterir.

3. AYDINLATMA YÖNETİMİ VE ENERJİ–ÜRETİM İLİŞKİSİ

Fotosentetik foton akısı yoğunluğu (PPFD), 400–700 nm aralığında birim alana birim zamanda ulaşan foton miktarıdır; birimi µmol m^{-2} s^{-1}'dir (Walter & Schöbel, 2023). Günlük ışık integrali (DLI), PPFD'nin gün boyunca integralidir. Denklem (1), PPFD'nin aydınlık dönem boyunca sabit kabul edildiği durumda kullanılır.

$$DLI = PPFD \times P \times 3600 \times 10^{-6} \quad (1)$$

DLI'nin birimi mol m^{-2} $gün^{-1}$, P'nin birimi saattir. Örneğin 200 µmol m^{-2} s^{-1} PPFD ve 16 saat fotoperiyot yaklaşık 11,5 mol m^{-2} $gün^{-1}$ sağlar. PPFD zamanla değişiyorsa sabit değer yerine ölçümlerin zamana göre integrali kullanılmalıdır. Aynı DLI, farklı ışık şiddeti ve süre bileşimleriyle sağlanabilir.

Bu ödünleşimin yönü deneysel olarak sınanmıştır. Aynı DLI (16 mol m^{-2} $gün^{-1}$) altında 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 saatlik fotoperiyotların karşılaştırıldığı bir çalışmada, fotoperiyot 10 saatten 20 saate çıkarıldığında marulda %16,0, mizunada %18,7 oranında yerüstü biyokütle artışı sağlanmıştır (Palmer & Iersel, 2020). Daha uzun fotoperiyot ve daha düşük PPFD bileşimi, ışık yakalanmasını, klorofil içeriğini ve fotosistem II kuantum verimini artırmış, buna karşın anlık CO_2 asimilasyonunu düşürmüştür. Bu sonuç, düşük PPFD'de fotosentezin daha verimli çalıştığı biyolojik temele dayanır ve aydınlatma enerjisinin gün içinde nasıl dağıtıldığının, toplam miktar kadar önemli olduğunu gösterir.

PPFD ve fotoperiyot birlikte değerlendirildiğinde DLI–verim ilişkisi çeşide göre değişmektedir. Kontrollü ortamda iki marul çeşidinde farklı DLI düzeylerinin farklı taze ağırlık sonuçları verdiği bildirilmiştir (Matysiak et al., 2022). Dolayısıyla tek bir optimum DLI yerine çeşit, gelişim dönemi, pazarlanabilirlik ve enerji tüketimi birlikte sınanmalıdır.

Uzak kırmızı fotonlar (700–750 nm), daha kısa dalga boylarıyla birlikte verildiğinde fotosenteze ve kanopinin ışık yakalamasına katkı sağlayabilir (Zhen & Bugbee, 2020). Yaprak alanı ve verim üzerindeki yanıt bitki sıklığına bağlıdır (Jin et al., 2021). Buna karşılık yüksek uzak kırmızı oranları klorofil ve stres göstergelerini olumsuz etkileyebilir (Velde et al., 2023). Spektral reçete yalnız biyokütle artışıyla değerlendirilmemelidir.

Aydınlatmanın üçüncü boyutu homojenliktir. Yetiştirme alanı üzerinde PPFD dağılımının düzgün olması, bitkiler arası

gelişim farklarını azaltır; çünkü ışık doygunluk noktasının altındaki uzamsal değişkenlik, tek tek bitkilerin gelişimini farklılaştırarak ürünün ekonomik değerini düşürür (Balázs et al., 2022). Yaygın kullanılan "minimum/ortalama PPFD oranı" biçimindeki homojenlik ölçütünün bu amaç için uygun olmadığı, bunun yerine foton ışınımının maksimuma göre normalleştirilerek histogramlarının incelenmesi ve yetiştirilen bitkinin ışık tepkisinin dikkate alınması önerilmiştir. Önemli bir ayrım, yetiştirme alanı üzerindeki PPFD dağılımının homojen olmasının bitki kanopisi üzerindeki dağılımın homojen olduğu anlamına gelmemesidir; optik simülasyonlar, yetiştirme alanı genelinde PPFD dağılımı düzgün olsa bile kanopi üzerinde düzgün olmadığını göstermiştir. Bitki örtüsü gelişimiyle birlikte ışığın yapraklar tarafından yakalanma biçimi de değişir. Üç boyutlu bitki modellemesi ve ışın izleme simülasyonuyla yapılan bir analizde, bitki sıklığı azaldıkça merkezdeki bitkinin ışık yakalaması yaklaşık %18,7 artarken komşu bitkilerin ışık yakalaması yaklaşık %5,5 azalmış; homojen ışık dağılımı altında ışık kullanım etkinliği açısından optimum ışık şiddeti yaklaşık 360 μmol m^{-2} s^{-1} ve LUE 6,5 g MJ^{-1} olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, ışık şiddeti ile bitki sıklığının birlikte optimize edilmesi gerektiğini gösterir.

Armatür yerleşimi de homojenliği ve toplam ışık yakalanmasını belirler. Kanopi içine yerleştirilen (intra-canopy) aydınlatma ile üstten aydınlatmanın karşılaştırıldığı bir simülasyon çalışmasında, yatay yöndeki varyasyon katsayısı kanopi içi aydınlatmada %48, üstten aydınlatmada %43 iken, ikisinin birlikte kullanımı en düşük değeri (%37) vermiş; kanopi içi aydınlatma tek başına toplam ışık soğurmasını %8 artırırken, %50 kanopi içi + %50 üstten aydınlatma kombinasyonu ışık soğurmasını %4 artırmıştır (Schipper et al., 2023). Aydınlatmanın kanopiye yakın konumlandırılması (close-canopy lighting), ışığın yapraklara ulaşma

verimini artırarak enerji tasarrufu sağlayan bir strateji olarak değerlendirilmektedir; bu yaklaşımda LED paketlerinin görüş açıları (tipik olarak 120°–130°) ve kenar etkilerinden kaçınmak için yeterli sayıda armatürün yerleştirilmesi kritik önemdedir (Sheibani et al., 2023).

Son olarak, ışık ölçümünün kendisi bir hata kaynağıdır. Lümen, lüks ve foot-candle gibi fotometrik birimler insan gözünün parlaklık tepkisine dayanır ve insan gözü yeşile kırmızı ve maviye kıyasla daha duyarlıdır (Bilodeau et al., 2019). Bu birimler fotosentetik organizmaların aydınlatmasını tanımlamak için uygun değildir; kolorimetrik ölçümlerin ve lüks metre benzeri fotometrik sensörlerin kullanımından kaçınılması, bunun yerine foton temelli büyüklüklerin kullanılması gerektiği belirtilmektedir. LED'lerin en verimli renkleri derin kırmızı ve mavi bölgede olduğundan, aydınlatma verimliliğinin lümen/watt yerine µmol/J cinsinden karşılaştırılması özellikle önemlidir (Nelson & Bugbee, 2014). Foton etkinliği, ışınım enerjisi verimiyle karıştırılmamalıdır: etkinlik (efficacy) farklı birimlerin oranıdır ve bir watt'lık elektrik girdisi başına mikromol foton çıkışını ifade eder. Aydınlatma ve mikroiklim değişkenlerinin ölçüm yöntemi, fizyolojik etkisi ve sistem içi ilişkileri Çizelge 2'de bir arada verilmiştir; çizelgenin son satırları, aydınlatma kararlarının kök bölgesine kadar uzanan dolaylı etkisini göstermektedir.

Çizelge 2. Aydınlatma ve mikroiklim değişkenleri: ölçüm yöntemi, fizyolojik etkisi ve diğer bileşenlerle ilişkisi

Değişken	Ölçüm	Bitki etkisi	Sistem bağlantısı
PPFD ve DLI	Kuantum sensörü; zaman integrali	Fotosentez ve büyüme	Elektrik ve ısı yükü
Spektrum	Spektroradyometre	Morfoloji ve kalite	Tür, sıklık ve ışık dozu

Değişken	Ölçüm	Bitki etkisi	Sistem bağlantısı
Sıcaklık ve RH	Kalibre sensörler	Terleme ve gelişme	VPD ve iklimlendirme
Hava hızı	Kanopi anemometresi	Sınır tabakası	Homojenlik ve fan enerjisi
EC ve pH	Çözelti probları	İyon alınabilirliği	Dozlama; EC bileşimi göstermez
DO ve çözelti sıcaklığı	DO ve sıcaklık probları	Kök solunumu	Akış, havalandırma ve ısı yükü

Kaynak: Çizelgedeki değişkenler, ölçüm yöntemleri ve ilişkiler metinde ilgili yerlerde atıf verilen çalışmalardan derlenmiştir. Farklı çalışmalardan gelen optimum değerler farklı tür, çeşit ve koşullarda elde edildiğinden evrensel optimum olarak yorumlanmamalıdır.

4. İKLİMLENDİRME, NEM YÖNETİMİ VE HAVA DAĞILIMI

İklimlendirme, uygun sıcaklık ve nemi korurken aydınlatma ile bitkilerden kaynaklanan duyulur ve gizli ısı yüklerini yönetir. Yaprak çevresindeki sınır tabakası ısı ve gaz alışverişine direnç oluşturur; kalınlığı hava hareketi ve yaprak morfolojisine bağlıdır. Bu nedenle ortam ortalamaları kadar kanopi içindeki dağılım da önemlidir.

Sıcaklık ve nemin birlikte etkisini tek bir büyüklükte ifade eden gösterge buhar basıncı açığıdır (vapor pressure deficit, VPD). VPD, belirli bir sıcaklıkta havanın doygun buhar basıncı ile gerçek buhar basıncı arasındaki farktır ve havanın su buharı için ne kadar "aç" olduğunu gösterir; doygun buhar basıncı Denklem (2a), VPD ise Denklem (2b) ile hesaplanır.

$$SVP(T) = 0.6108 e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} \quad (2a)$$

$$VPD = SVP(T)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (2b)$$

SVP doygun buhar basıncı (kPa), T hava sıcaklığı (°C), RH bağıl nem (%) ve VPD buhar basıncı açığıdır (kPa). Bu hesap hava VPD'sini verir; yaprak sıcaklığı hava sıcaklığından farklıysa yaprak–hava buhar basıncı farkı ayrıca değerlendirilmelidir. Terleme ayrıca stoma ve sınır tabakası direncine bağlıdır.

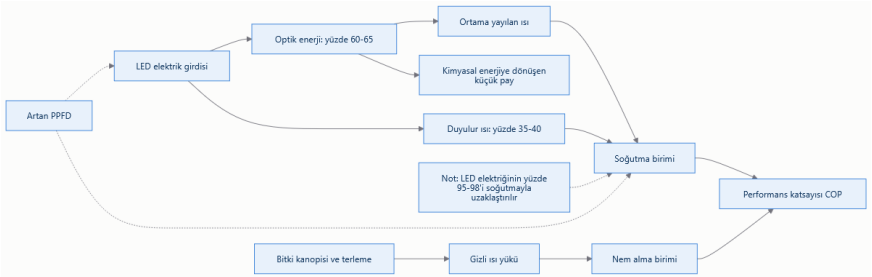
Hidroponik domateste yüksek (2,1 kPa) ve düşük (0,3 kPa) VPD karşılaştırıldığında su ve besin alımı ile kuru madde birikiminin çeşide göre değiştiği gösterilmiştir (Detering et al., 2026). Yüksek VPD her koşulda daha iyi büyüme anlamına gelmez. İklim yönetimi, köklerin su sağlama kapasitesi ve besin çözeltisi dengesiyle birlikte ele alınmalıdır.

Soğutma ve nem alma yükleri birbirinden ayrılmalıdır. Bir bitki fabrikası modellemesinde nem alma önemli bir yıllık enerji kalemi olarak bulunmuş; duyulur ve gizli ısının ayrı yönetimi enerji gereksinimini azaltabilmiştir (Choi et al., 2025). Çilek yetiştirme odasında LED aydınlatma ve yoğuşma önemli ısı yükleri oluşturmuştur (Chaichana et al., 2020). Şekil 2 bu bağlantıyı kavramsal olarak göstermektedir; oranlar farklı tesislere doğrudan aktarılamaz.

Çok katlı sistemlerde mikroiklim farklılıkları, tek katlı sistemlere kıyasla daha belirgin bir sorun hâline gelir. Sınır tabakası direnci ve bitki engellemesi nedeniyle bitkiler çevresinde düzgün hava akışı sağlamak güçtür; bu da hava sıcaklığı, bağıl nem ve CO_2 konsantrasyonunda homojensizliğe yol açar. Ölçülen bir bitki fabrikasında sıcaklık ve hız farklarının sırasıyla 2,7 °C ve 1,4 m s^{-1} düzeyine ulaşabildiği bildirilmiştir. Bu farklar, tek bir ölçüm noktasından yola çıkarak tüm sistemi yönetmenin yanıltıcı olacağını gösterir. Hava dağıtım tasarımı bu nedenle kritik bir tasarım parametresidir. Konteyner tipi bir dikey tarımda hava akışı homojenliğinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile optimize edildiği bir çalışmada, kanopiye doğrudan yönlendirilen

yerelleştirilmiş hava dağıtımı, raf sonuna eklenen hava akışına kıyasla belirgin biçimde üstün bulunmuş; kat uzunluğu boyunca yerleştirilen hava girişleriyle 0,65 m s^{-1} ortalama hız ve %33 varyasyon katsayısı elde edilirken, ek çıkışların eklenmesiyle varyasyon katsayısı %10'a kadar düşürülmüştür. Hava hızının büyüklüğü de bitki tepkisini belirler: 0, 0,35, 0,5, 0,65 ve 0,8 m s^{-1} kanopi hava hızlarının karşılaştırıldığı bir denemede, 0,8 m s^{-1} uygulanan grupta kontrol grubuna kıyasla fotosentez ve terleme hızı ile taze ve kuru ağırlık sırasıyla %17,8, %21,7, %29,6 ve %29,9 artmış; kanopi hava sıcaklığı ve bağıl nem sırasıyla 1,3 °C ve %3,2 azalmıştır (Zhang et al., 2025). Bu sonuçlar, hava hareketinin yalnızca ısı ve nem taşınmasını değil, doğrudan gaz alışverişini de etkilediğini gösterir. Modelleme çalışmaları, sera koşullarında 0,2 m s^{-1}'den küçük hava hızı artışlarının gündüz fotosentezini %10–20 artırabileceğini, ancak aşırı hava hareketinin mekanik etkiler ve aşırı terleme yoluyla büyümeyi olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Hava hızının aerodinamik direnci değiştirerek terleme ve büyüme hızını etkilediği, dolayısıyla hava dağıtımının yalnızca ısı tahliyesi değil, bitki fizyolojisi açısından da değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Şekil 2. Aydınlatma ile soğutma ve nem alma yükleri arasındaki ilişkiyi açıklayan kavramsal şema



Kaynak: Isı yükü dağılımı, yoğuşma ısı yükü ve duyulur/gizli ısı ayrımı verileri temel alınarak bu bölüm için özgün olarak çizilmiştir. Şemadaki sayısal aralıklar belirli bir tesise aittir ve genellenmemelidir.

5. HİDROPONİK SİSTEMLERDE SU VE BESİN MADDESİ YÖNETİMİ

Kapalı devre hidroponik üretim, besin çözeltisini yeniden dolaştırarak su ve gübre tahliyesini azaltır. Buna karşılık pompalar, havalandırma, dezenfeksiyon ve ölçüm altyapısı elektrik gerektirir. Sistem seçimi yalnız su tasarrufuna göre yapılamaz; verim, kaynak tüketimi ve işletme güvenilirliği birlikte değerlendirilmelidir.

NFT, DWC, substratlı ve aeroponik sistemler su hacmi, oksijen sağlama, pompalama ve arıza duyarlılığı bakımından farklıdır. Bir karşılaştırmada enerji kullanım etkinliği NFT'de 31,3, DWC'de 24,53 g kWh^{-1} bulunmuştur (Gillani et al., 2023). Başka bir çalışmada sulama ve iklim yönetimi dâhil su kullanım etkinliği substratlı sistemde 28,1, aeroponikte 52,9 g L^{-1} olarak raporlanmıştır (Carotti et al., 2023). Bu sonuçlar evrensel üstünlük sıralaması oluşturmaz. Temel farklar Çizelge 3'te verilmiştir.

Elektriksel iletkenlik (EC), toplam iyon içeriğinin göstergesidir; tek tek besinlerin miktarını ve oranını göstermez. Seçici alım, evapotranspirasyon ve Na^{+}–Cl^{-} birikimi aynı EC altında

farklı çözelti bileşimleri oluşturabilir (Bannon et al., 2026). EC, hacim ve sıcaklık kayıtlarıyla birlikte izlenmeli; uzun süreli geri dönüşümde iyon analizleriyle desteklenmelidir.

Hedef EC'de tutulan geri dönüştürülmüş çözeltide besin dengesizlikleri nedeniyle marul sürgün taze ve kuru ağırlığının %22–36 azaldığı bildirilmiştir {MillerA20}. Geri dönüşüm bu nedenle yalnız su tamamlamak veya EC'yi sabit tutmakla sınırlandırılmamalıdır. İyonların seçici tüketimi dikkate alınarak stok çözelti dozları ve gerektiğinde kısmi yenileme planlanmalıdır (Bugbee, 2004).

İyon bazlı yönetim, iyon seçici elektrotların (ion-selective electrode, ISE) kullanımını gerektirir. Bu sensörler çözeltideki NO_3, K ve Ca gibi belirli iyonların konsantrasyonunu gerçek zamanlı ölçebilir ve stok çözeltilerin sıralı olarak dozlanmasını sağlayabilir (Cho et al., 2017). Bu yaklaşımın uygulandığı bir gömülü sistemde, 27 günlük marul yetiştirme denemesi boyunca hedef konsantrasyonlar (NO_3 için 436, K için 117, Ca için 80 mg L^{-1}) sırasıyla −15,0 ± 18,1, −5,0 ± 10,0 ve −9,2 ± 4,1 mg L^{-1} hata ile tutulabilmiştir. Ancak kalibrasyon ve ölçüm arka plan çözeltisinin farklı olması nedeniyle Ca tahminlerinin düşük kalması sonucu hazırlanan Ca konsantrasyonları hedefin yaklaşık %33 üzerinde gerçekleşmiştir. Bu tür sensörlerin sera ve uzay uygulamalarında potansiyeli uzun süredir tartışılmakta, ancak çevrimiçi ölçüm için ideal bir çözümün henüz bulunmadığı belirtilmektedir (Bamsey et al., 2012). EC ölçümünün kendisi de kalibrasyon ve sıcaklık telafisi gerektirir; sıcaklık etkilerinin telafi edildiği çevrimiçi bir iletkenlik cihazının ticari referans cihazla uyum içinde çalıştığı gösterilmiştir (Strob et al., 2026).

Çözelti pH'ı besinlerin çözünürlüğünü etkiler. pH 7'nin üzerinde fosforun alınabilirliği çökelme nedeniyle azalabilir (Cerozi & Fitzsimmons, 2016). Genel hidroponik yönetimde pH çoğunlukla

5,5–6,5 aralığında tutulur; uygun aralık türe ve çözelti bileşimine bağlıdır (Sambo et al., 2019). Seçici iyon alımı pH'ı zamanla değiştirdiğinden ölçüm ve dozlama düzenli yapılmalıdır.

Çözünmüş oksijen (DO), kök solunumu ve su–iyon alımı açısından önemlidir. Çözelti ısındığında oksijen çözünürlüğü düşerken kök ve mikroorganizma tüketimi artabilir. NFT'de oksijen desteğinin marul büyümesini iyileştirdiği gösterilmiştir (Nițu et al., 2024). Ancak eşikler ürün ve koşullara bağlıdır; sıcaklık, akış ve DO birlikte değerlendirilmelidir.

Geri dönüşümün biyolojik riskleri, su ve besin tasarrufunun gizli maliyetidir. Hidroponik üretimde insan patojenleriyle kontaminasyon durumunda, toprakta yetiştirilen ürünlerden farklı olarak patojenler dolaşan su yoluyla hızla yayılarak tesisteki tüm bitkileri eşzamanlı olarak enfekte edebilir (Sela et al., 2023). Bu risk, çözeltinin dezenfeksiyonunu ve sıkı fitosaniter önlemleri gerekli kılar. Dezenfeksiyon yöntemleri arasında kimyasal, fiziksel, çoklu bariyer ve biyolojik yaklaşımlar değerlendirilmiş; 131 ilgili çalışmadan 32'sinde 53 farklı müdahale incelenmiş ve ticari ölçeğe yakın hidroponik sistemlerde insan patojenlerinin kontrolüne ilişkin kanıtlarda önemli boşluklar bulunduğu, yöntem ve sonuçların ayrıntılı raporlanmasında eksiklikler olduğu belirlenmiştir (Ivey et al., 2025). Sodyum hipokloritin test edilen dezenfektanlar arasında en etkili ve ekonomik seçenek olduğu, ancak uygulama sonrası sistemin durulanmasının kritik önemde olduğu bildirilmiştir (Tham et al., 2024). Kimyasal dezenfektan kullanımından kaçınmayı hedefleyen yaklaşımlar da geliştirilmektedir; 254 nm UV-C ışığı ile yapılan su arıtımı, besin çözeltisindeki E. coli popülasyonunda 1,4–1,5 $\log_{10}$ CFU mL^{-1} düzeyinde anlamlı azalma sağlamıştır (Moore et al., 2025). UVA-LED temelli dezenfeksiyon da önerilen yaklaşımlar arasındadır (Tsunedomi et al., 2018).

Yoğuşma suyunun sulamaya döndürülmesi dışarıdan su gereksinimini azaltabilir. Sıvı kurutuculu bir sistemde geri kazanılan suyun iletkenliği 18 µS cm^{-1}'in altında bulunmuştur (Lefers et al., 2019). Bununla birlikte su kalitesi iklime, bina kullanımına ve toplama yüzeylerinin malzemesine bağlıdır (Jurga et al., 2022). Yeniden kullanım, kimyasal ve mikrobiyolojik kalite kontrolüyle birlikte yürütülmelidir.

Çizelge 3. Hidroponik sistemlerin su, besin, enerji ve işletme gereksinimleri açısından karşılaştırılması

Sistem	Su	Besin yönetimi	Enerji	İşletme sınırı
NFT	Düşük dolaşım hacmi	Akış ve iyon dengesi	Pompa gereksinimi	Akış kesintisine duyarlı
DWC	Yüksek çözelti hacmi	Tamponlama yüksek	Havalandırma gerektirir	DO ve sıcaklık kritik
Substratlı	Tutma kapasitesine bağlı	Substrat etkisi	Sulama yöntemine bağlı	Ortam yenileme ve bertaraf
Aeroponik	Etkin püskürtmeye bağlı	Kök bölgesine uygulama	Basınçlı pompalama	Nozul tıkanması ve dağılım
Kapalı devre	Tahliye azalır	İyon dengesinin izlenmesi	Arıtma ek enerji ister	Patojen ve tuz birikimi

Kaynak: Çizelgedeki değerler metinde ilgili yerlerde atıf verilen çalışmalardan derlenmiştir. Farklı çalışmalar, ürünler ve koşullar nedeniyle değerler doğrudan karşılaştırılmamalıdır; tablo sistemler arası eğilimleri göstermek amacıyla düzenlenmiştir.

6. AYDINLATMA–İKLİMLENDİRME–HİDROPONİK YÖNETİM ETKİLEŞİMLERİ

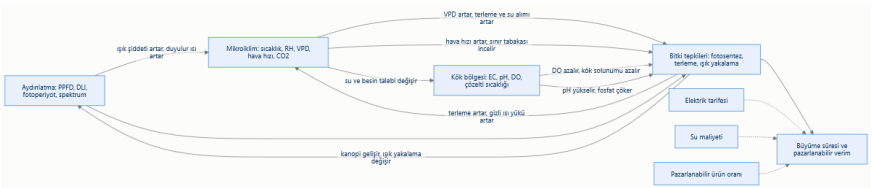
Bütünleşik yaklaşım, bir bileşendeki kazanımın diğerlerindeki maliyetini görünür kılar. Işık artışı fotosentez yanında ısı yükünü; hava hareketi gaz alışverişi yanında terlemeyi; geri

dönüşüm ise su tasarrufu yanında biyolojik riskleri değiştirir. Şekil 3 ve Çizelge 4 temel ilişkileri birlikte göstermektedir.

CO_2 dağıtımında yerelleştirme, tüm hacmi zenginleştirmeye göre kaynak etkinliğini artırabilir. Sera koşullarında kanopiye yerelleştirilmiş beslemenin CO_2 kullanımına göre fotosentetik kazanımı yaklaşık 4,4 kat artırdığı bildirilmiştir (Zhang et al., 2022). Ancak bu oran dikey tarıma doğrudan aktarılamaz. Bitki gereksinimi, kanopi içi dağılım, kaçaklar ve CO_2 kaynağının maliyet ve çevresel yükü birlikte ölçülmelidir.

Evrensel bir optimum set değerleri kümesi bulunmaz. Tür, çeşit, gelişim dönemi, raf geometrisi ve yerel kaynak maliyetleri uygun çalışma aralığını değiştirir. Bütünleşik optimizasyonda amaç, bitki gereksinimlerini ve ekipman sınırlarını koruyarak pazarlanabilir ürün başına toplam girdiyi azaltmaktır.

Şekil 3. Aydınlatma, mikroiklim, kök bölgesi ve bitki tepkileri arasındaki etkileşim şeması



Kaynak: VPD–besin alımı, hava hızı–sınır tabakası, pH–çökelme, DO–kök solunumu ve ışık–ısı yükü ilişkileri temel alınarak bu bölüm için özgün olarak çizilmiştir. Şemadaki oklar ilişkilerin yönünü gösterir; sayısal değerler metinde ve çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4. Aydınlatma–iklimlendirme–hidroponik yönetim arasındaki etkileşimler ve ödünleşimler

Etkileşim	Beklenen yarar	Ödünleşim	Değerlendirme
Işık artışı	Fotosentez artabilir	Isı ve elektrik artar	Ürün başına toplam enerji
Uzun fotoperiyot, düşük PPFD	Aynı DLI'de büyüme artabilir	Tür ve karanlık süre sınırları	Verim ve kalite
VPD ve hava hareketi	Taşınım iyileşebilir	Terleme ve fan yükü	Su dengesi ve mikroiklim
Yerel CO_2 besleme	Kayıplar azalabilir	Dağılım ve kaynak maliyeti	Asimilasyon / verilen CO_2
Çözelti geri dönüşümü	Su ve gübre tasarrufu	İyon ve patojen riski	Verim; çözelti kalitesi

Kaynak: Çizelgedeki etkileşimler ve sayısal değerler, bu bölümde metin içinde atıf verilen çalışmalardan derlenmiştir. Etkiler tür, çeşit ve gelişim dönemine göre değiştiğinden sayısal değerler evrensel optimum olarak değil, belirli koşullarda ölçülmüş büyüklükler olarak okunmalıdır.

SENSÖRLERE DAYALI BÜTÜNLEŞİK KONTROL VE OPTİMİZASYON

Temel ölçüm grupları; PPFD, hava sıcaklığı ve bağıl nem, kanopi hava hızı ve CO_2 ile kök bölgesindeki EC, pH, DO ve çözelti sıcaklığıdır. İyon bazlı yönetimde ek sensörler veya periyodik laboratuvar analizleri gerekir. Çizelge 5, ölçüm ve kontrol araçlarının kullanım amaçlarını ve sınırlılıklarını özetlemektedir.

Sensörler kanopi, kenar bölgeleri ve kök bölgesi giriş–çıkışındaki değişkenliği temsil etmelidir. Yerleşim ve veri işleme yöntemlerinin açık raporlanması gerekir (Both et al., 2015). Tek nokta ölçümüyle tüm rafların aynı koşulda olduğu

varsayılmamalıdır. Kontrol için kullanılan ölçüm ile doğrulama ölçümü mümkün olduğunca ayrılmalıdır.

Kalibrasyon ve veri kalitesi, ölçüm zincirinin en zayıf halkasıdır. Ekipman bilgilerinin (model, üretici, hassasiyet ve doğruluk) raporlanması, kalibrasyon prosedürünün ve en son kalibrasyon tarihinin belirtilmesi, sensörlerin deney öncesi ve sonrasında kalibre edilmesi ve çok noktalı kalibrasyon yapılması önerilmektedir. Düşük maliyetli dijital sensörlerin metrolojik özellikleri sistemli olarak incelenmiş ve farklı sensör tipleri arasında sistematik sapmalar olduğu gösterilmiştir (Vovna et al., 2020). Ölçüm belirsizliğinin nicelendirilmesi, veri kalitesinin ayrılmaz parçasıdır: bir serada sıcaklık ve bağıl nem sensörleri için genişletilmiş belirsizlik, kapsama faktörü k = 2 (normal dağılımda %95 güven düzeyi) ile sıcaklık için 0,264–0,267 °C, bağıl nem için %2,559–3,169 olarak hesaplanmıştır (Sanna et al., 2018). Çoklu sensör ağlarında, sensörlerin birbirine göre sapmalarının belirlenerek düzeltilmesi, her sensörün ölçüm hatasını ortalama değerlerin %2'si içine indirebilmektedir (Fletcher & Fisher, 2021). Doğrulama testini geçemeyen problar için basit korelasyon yöntemlerine dayalı bir kalibrasyon prosedürü uygulanarak ölçüm hassasiyeti anlamlı biçimde iyileştirilebilmektedir (Ceccarelli et al., 2024). Bu sonuçlar, kalibrasyonun tek seferlik değil, sürekli bir süreç olarak ele alınması gerektiğini gösterir.

Kontrol yaklaşımları, amaç ve uygulanabilirlik açısından farklılaşır. Eşik tabanlı kontrol, en yalın yaklaşımdır: ölçülen değer bir alt veya üst sınıra ulaştığında ilgili eyleyici devreye girer. Uygulaması kolaydır ve sensör güvenilirliği yeterli olduğunda kararlı çalışır; ancak ödünleşimleri göremez, eşikler arasında kalan bölgede kaynak kullanımını optimize etmez ve gecikmeli sistemlerde salınıma yol açabilir. PID kontrolü, hata teriminin oransal, integral ve türev bileşenlerini kullanarak daha yumuşak bir

takip sağlar ve sıcaklık kontrolünde etkilidir; ancak çok değişkenli, kısıtlı ve gecikmeli bir sistemde tek döngülü PID'ler birbiriyle çelişen eylemler üretebilir. Model öngörülü kontrol (model predictive control, MPC), süreç modelini kullanarak bir zaman ufku boyunca kısıtlar altında en iyi eylem dizisini hesaplar; bu nedenle kısıtlı, doğrusal olmayan ve çok girdili-çok çıktılı sistemler için uygundur (Blaud et al., 2023). Sera iklim kontrolünde MPC'nin PID ile karşılaştırıldığı çalışmalarda MPC'nin sıcaklık kontrol performansını artırdığı gözlenmiştir (Lin et al., 2020). Sensör katmanından uygulayıcılara ve bitkiye uzanan, bitkiden tekrar sensöre dönen bu karar döngüsü Şekil 4'te gösterilmiştir.

MPC'nin enerji ve maliyet açısından sağladığı kazanç, sayısal olarak gösterilmiştir. Venlo tipi bir serada hiyerarşik MPC uygulamasında, toplam işletme maliyetini en aza indirmeyi hedefleyen strateji, diğer iki stratejiye kıyasla toplam maliyeti sırasıyla %72,07 ve %71,41 azaltmış; ayrıca MPC'nin referans yörüngeleri açık döngü kontrolden daha iyi takip ettiği gösterilmiştir. Yarı kapalı bir serada veri odaklı MPC yaklaşımı, kış ve yaz koşullarında sırasıyla 0,33 °C ve 0,36 °C RMSE ile adaptif kontrol sisteminden daha iyi sıcaklık kontrolü sağlamış ve enerji tüketiminde kışın %7,70, yazın %16,57 azalma elde etmiştir (Mahmood et al., 2021). Bu bulgular, MPC'nin hem ürün koşullarını hem enerji tüketimini birlikte iyileştirebildiğini göstermektedir. Çok amaçlı optimizasyon çerçevesinde, kontrol hatası ile enerji tüketimi gibi çelişen hedefleri birlikte ele alan yaklaşımlar da geliştirilmiştir; Pareto çözümlerine dayalı çok amaçlı optimizasyon, üretimi ve kaliteyi en üst düzeye çıkarırken su tüketimini en aza indirmeyi ya da ışık ve sıcaklık koşullarını birlikte kontrol etmeyi hedefleyebilmektedir. Enerji ve su tüketimini kontrol indeksine dâhil eden, doğrusal olmayan modeller ile genetik algoritmaları birleştiren model tabanlı öngörülü kontrol uygulamaları da bu alanda

öncü çalışmalar arasındadır (Blasco et al., 2007). Geleneksel çok amaçlı kontrol yöntemlerine kıyasla enerji tasarrufunda avantaj sağlayan iki katmanlı uyumlu kontrol algoritmaları da önerilmiştir (Xu & Hu, 2007).

Yapay zekâ yöntemleri, bu tabloda ancak somut katkıları ve veri gereksinimleriyle birlikte değerlendirildiğinde anlam kazanır. Kontrollü ortam tarımında derin öğrenme uygulamalarını inceleyen bir derlemede, taranan 72 çalışmanın %82'sinin seralara odaklandığı, başlıca uygulama alanlarının verim tahmini (%31) ve büyüme izleme (%21) olduğu; en yaygın modelin evrişimli sinir ağı (%79), en yaygın optimize edicinin Adam (%53) ve en yaygın değerlendirme parametresinin doğruluk (%21) olduğu; mikroiklim modellemesine yönelik tüm çalışmaların ise model değerlendirme parametresi olarak RMSE kullandığı belirlenmiştir (Ojo & Zahid, 2022). Bu dağılım, derin öğrenmenin ağırlıklı olarak tahmin ve izleme problemlerinde yoğunlaştığını, kontrol problemlerinde ise henüz daha sınırlı kaldığını gösterir. Hidroponik sistemlerde marul verim tahminine yönelik makine öğrenmesi yaklaşımlarının karşılaştırmalı analizinde, veri entegrasyonu ve tahmin doğruluğu temel kısıtlar olarak öne çıkmaktadır (Sharmin et al., 2025). Kontrollü ortam tarımının çevre kontrolünde yapay zekâ uygulamaları; iklim koşulu tahmini, verim tahmini, hastalık tespiti ve ileri kontrol sistemleri başlıklarında toplanmakta, ancak rafine edilmiş modeller, sağlam veri kümeleri ve uygulama belirsizliklerine çözüm gereksinimi sürdürmektedir (Chen et al., 2025). Sensör, otomasyon ve yapay zekâyı birleştiren akıllı çevre kontrol sistemlerinin temel katkısı, gerçek zamanlı veriye dayalı sürekli ayar yapabilmesi ve bitki tepkilerini öngörerek önleyici yönetim stratejileri sunabilmesidir; ancak enerji yönetimi, ölçeklenebilirlik ve sistem uyumlaştırması gibi zorluklar devam etmektedir (Kaya, 2025). Bu nedenle yapay zekâ, veri kalitesi ve

kalibrasyon güvencesi sağlanmadığı sürece kontrol mimarisinin merkezine değil, destekleyici bir katman olarak konumlandırılmalıdır.

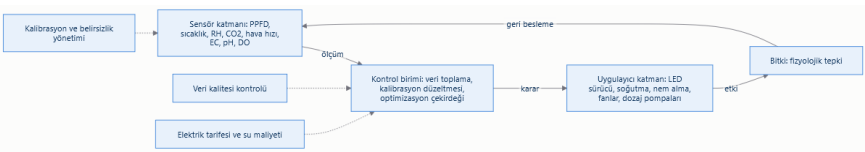
Aydınlatmada maliyet optimizasyonu, günlük gereksinimi ve güç sınırlarını korurken saatlik elektrik maliyetini en aza indirmeyi hedefleyebilir. Denklem (3) bu sınırlı problemi ifade eder. Gerçek uygulamada minimum karanlık süresi, anlık ışık sınırları ve iklimlendirme kapasitesi de kısıtlara eklenmelidir.

$$\min C = \sum_{i=1}^{24} p_i E_i \qquad (3)$$

$$kısıt: \sum_{i=1}^{24} E_i = E_{\text{gün}}, 0 \le E_i \le E_{\text{maks}} \Delta t$$

C günlük maliyet, p_i elektrik birim fiyatı, E_i ilgili zaman dilimindeki enerji (kWh), E_gün günlük enerji gereksinimi, E_maks ise maksimum güçtür; Δt saat cinsinden zaman adımıdır. Günlük elektrik enerjisinin sabit tutulması ancak armatür etkinliği ve ışığın bitkiye ulaşma oranı değişmiyorsa aynı DLI'yi temsil eder. Dikey tarımda aydınlatma zamanlamasının kaydırılmasıyla maliyette %16–26 azalma bildirilmiştir (Avgoustaki & Xydis, 2021). Yük kaydırma tüketimin miktarını değil zamanını değiştirebilir; maliyet tasarrufu enerji tasarrufuyla eş tutulmamalıdır.

Şekil 4. Sensör–kontrol birimi–uygulayıcı–bitki geri besleme döngüsü



Kaynak: Sensör grupları ve ölçüm aralıkları, kalibrasyon ve belirsizlik gereksinimleri, kontrol mimarisi ve çok amaçlı optimizasyon çerçevesi temel alınarak bu bölüm için özgün olarak çizilmiştir.

Çizelge 5. Sensörler ve kontrol yaklaşımları: ölçülen değişken, kullanım amacı ve sınırlılık

Araç	İşlev	Amaç	Sınırlılık
Kuantum sensörü	PPFD ve DLI	Aydınlatma yönetimi	Konum ve kalibrasyon
T / RH / hava hızı	Mikroiklim dağılımı	İklimlendirme	Tek nokta yetersizdir
EC / pH / DO	Kök bölgesi koşulları	Besleme ve havalandırma	İyon bileşimi ayrıca izlenir
İyon seçici elektrot	Belirli iyonlar	Bireysel dozlama	Arka plan ve sensör sapması
Eşik / PID	Tepkisel kontrol	Basit işletme	Döngüler arası çatışma
MPC	Kısıtlı öngörü	Ortak enerji–ürün hedefi	Model ve veri güvenilirliği
Yapay zekâ	Tahmin ve izleme	Karar desteği	Bağımsız doğrulama

Kaynak: Çizelgedeki sensörler, kontrol yaklaşımları ve sayısal değerler metinde ilgili yerlerde atıf verilen çalışmalardan derlenmiştir. Ölçüm aralıkları ve set değerleri uygulamada kalibrasyonla doğrulanmalıdır.

7. EKONOMİK VE ÇEVRESEL PERFORMANSIN BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ekonomik değerlendirme, enerji faturası kadar pazarlanabilir ürün miktarına bağlıdır. Bir dikey tarım analizinde enerji giderleri toplam üretim maliyetinin yaklaşık %30'una ulaşmıştır (Arcasi et al., 2023). Bu oran tesis ve tarife koşullarına özgüdür. Yüksek toplam biyokütle, kalite kayıpları ve uzun çevrim süresi hesaba katılmadığında yanıltıcı bir başarı ölçütü olabilir.

Armatür etkinliğinin artması aynı DLI için elektrik gereksinimini ve iklimlendirme yükünü azaltabilir. Soğutma performansı Denklem (4)'teki performans katsayısıyla (COP) değerlendirilir. Karşılaştırmalarda yalnız cihazın anlık değeri değil, gerçek sıcaklık ve nem koşullarındaki dönemsel performansı kullanılmalıdır.

$$COP = \frac{Q_{\text{yararlı}}}{W_{\text{elektrik}}} \quad (4)$$

Q_yararlı uzaklaştırılan ısı, W_elektrik harcanan elektrik enerjisidir; aynı enerji birimi kullanıldığında COP boyutsuzdur. COP dış iklim ve çalışma koşullarıyla değişir. Sabit COP kabulü özellikle sıcak iklimlerde enerji talebini olduğundan düşük gösterebilir (Weidner et al., 2021).

Elektrik üretim karışımı çevresel sonucu belirler. İskoçya örneğinde elektrik tüketimi karbon ayak izinin %91'ini oluşturmuş; yenilenebilir elektrik payının artması ürün başına iklim etkisini azaltmıştır (Sandison et al., 2022). Ancak iklim değişikliği göstergesindeki iyileşme bütün etki kategorilerinin iyileştiği anlamına gelmez. Elektrik, malzeme ve su akışları aynı işlevsel birimle karşılaştırılmalıdır.

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde sistem sınırı ve işlevsel birim seçimi, sonucu doğrudan belirler. Yaygın yaklaşım, işlevsel birimi 1 kg taze marul (bitkinin yenilebilir kısmı) olarak tanımlamak ve sera ile dikey tarım senaryolarını iklim değişikliği, kaynak kullanımı ve kümülatif enerji talebi gibi etki kategorileri üzerinden karşılaştırmaktır; bu tür analizlerde ortalama ve yenilenebilir elektrik üretimi seçenekleri ayrı senaryolar olarak ele alınmakta, aydınlatma ve diğer elektrikli cihazların atık ısısının ısıtma amacıyla kullanılıp kullanılmadığı sonucu etkilemektedir (Joensuu et al., 2024). Beşikten rafa (cradle-to-shelf) kapsamı benimseyen bir başka çalışmada işlevsel birim, satış noktasına teslim edilen 1 kg taze ürün olarak tanımlanmış ve üretim, hasat ile pazara dağıtım süreçleri modele dâhil edilmiştir (Goldstein et al., 2016). Sistem sınırının genişletilmesi, sonuçları önemli ölçüde değiştirir: ambalaj, altyapı ve ürünlerin perakendeye dağıtımı, ticari bir dikey tarım tesisinde sistemin başlıca sıcak noktaları arasında bulunmuştur (Martin et al., 2023). Birleşik Krallık'taki ticari bir dikey tarım tesisinin beşikten

müşteriye analizinde, elektrik talebi ve fide kabı olarak kullanılan ortam sistemin ana sıcak noktaları olarak belirlenmiş; dikey tarımın sera veya tarla üretimine kıyasla tatlı su ötrofikasyonu ve asidifikasyon potansiyeli gibi bazı kategorilerde daha yüksek etki gösterebildiği bildirilmiştir (Gargaro et al., 2024). Dikey tarımın elektrik üretimi için gereken arazi, çok katlı üretimden kazanılan alandan daha büyük olabilmekte; bu da "daha az arazi kullanır" iddiasının bağlama göre geçersiz olabileceğini göstermektedir. Elektrik kaynağının fosil yakıtlardan nükleer veya yenilenebilir kaynaklara geçişi, dikey tarımın çevresel sürdürülebilirliği için gerekli görülmektedir (Osman et al., 2023).

Su tasarrufu, tek başına düşük çevresel etki anlamına gelmez. Geri kazanım için gereken elektrik, dezenfeksiyon ve malzemeler hesaba katılmalıdır. HVAC ve yıkama suyu dışlandığında bildirilen su kullanım etkinliği, tesisin toplam performansını olduğundan yüksek gösterebilir. Sonuçlar sistem sınırı, elektrik senaryosu ve pazarlanabilir verimle birlikte raporlanmalıdır.

8. UYGULAMA SENARYOLARI VE YÖNETİM ÖNERİLERİ

Çizelge 6, temel yönetim senaryolarını ve değerlendirme ölçütlerini özetlemektedir. Yüksek ışık senaryosu öğretici bir varsayımdır; ölçülmüş optimizasyon sonucu değildir. Diğer senaryolarda deneysel veya model temelli bulgular mevcut olsa da bütünleşik tesis kazanımı ayrı doğrulanmalıdır. Her uygulama öncesinde başlangıç tüketimi, ürün kalitesi ve karşılaştırma dönemi belirlenmelidir.

Çizelge 6. Bütünleşik yönetim senaryolarının beklenen etkileri ve değerlendirme ölçütleri

Senaryo	Beklenen etki	Ölçüt	Kanıt sınırı
Yüksek ışık	Büyüme ve ısı yükü artışı	Verim, SEC, COP	Varsayımsal; tesis testi gerekir
Aynı DLI, uzun fotoperiyot	Biyokütle yanıtı değişir	DLI, çevrim, kalite	Tür ve koşula bağlı deney
Döneme göre yönetim	Talebe uygun girdi	Su, besin, verim	Bütünleşik etki doğrulanmalı
Yoğuşma geri kazanımı	Dış su talebi azalır	Su kalitesi ve enerji	İşletme kalitesi belirleyici
Besin geri kazanımı	Su ve gübre azalır	İyonlar, verim, patojen	EC tek başına yeterli değil
Yük kaydırma	Tarife maliyeti azalır	Maliyet, DLI, kalite	Enerji miktarı değişmeyebilir

Kaynak: Çizelgedeki senaryolar ve değerlendirme ölçütleri metinde ilgili yerlerde atıf verilen çalışmalara dayanmaktadır. "Varsayımsal" olarak işaretlenen satır bir ölçüm sonucunu değil, ödünleşimin yönünü göstermektedir.

9. SONUÇ VE ARAŞTIRMA GEREKSİNİMLERİ

Dikey tarımda kaynak verimliliği, aydınlatma, iklimlendirme ve hidroponik yönetimin ortak bir kaynak bütçesiyle ele alınmasına bağlıdır. Bir bileşenin tüketimini azaltmak, ürün başına toplam tüketimi mutlaka düşürmez. Şekil 1 kaynak döngülerini, Şekil 3 ise yönetim kararlarının bitki tepkilerine uzanan bağlantılarını özetlemektedir.

Enerji, su, besin ve CO_2 kazanımları farklı ölçüm temelleriyle tek bir sürdürülebilirlik yargısına indirgenmemelidir. Ekonomik değerlendirme pazarlanabilir ürün başına maliyete; çevresel değerlendirme tanımlı sistem sınırı ve işlevsel birime

dayanmalıdır. Elektrik karışımı ve geri kazanımın ek girdileri açıkça raporlanmalıdır.

İşletmede öncelik sırası; güvenilir ölçüm, armatür ve hava dağılımının doğrulanması, kök bölgesi dengesinin korunması ve geri kazanımın kalite güvencesiyle kurulmasıdır. İleri kontrol, bu altyapı üzerinde kademeli uygulanmalıdır. Yönetim başarısı yalnız kısa süreli enerji azalmasıyla değil, tüm üretim çevriminde verim, kalite, maliyet ve kaynak tüketimiyle değerlendirilmelidir.

Araştırmada öncelikli ihtiyaçlar; standart sistem sınırları ve ölçüm protokolleri, iyon bazlı beslemenin uzun dönem kararlılığı, kanopi mikroikliminin temsili ölçümü ve çok amaçlı kontrolün ticari dikey tarımda doğrulanmasıdır. Ayrıca gelişim dönemine göre değişen reçeteler ile dezenfeksiyonun verim ve maliyete ortak etkisi incelenmelidir. Sera ve laboratuvar bulgularının ticari tesislere aktarılabilirliği bağımsız karşılaştırmalarla gösterilmelidir.

Kaynakça

Arabzadeh, V., Miettinen, P., Kotilainen, T., Herranen, P., Karakoç, A., Kummu, M., & Rautkari, L. (2022). Urban vertical farming with a large wind power share and optimised electricity costs. *Applied Energy*, *331*, 120416. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120416

Arcasi, A., Mauro, A. W., Napoli, G., Tariello, F., & Vanoli, G. P. (2023). Energy and cost analysis for a crop production in a vertical farm. *Applied Thermal Engineering*, *239*, 122129. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122129

Avgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2021). Energy cost reduction by shifting electricity demand in indoor vertical farms with artificial lighting. *Biosystems Engineering*, *211*, 219–229. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.006

Balázs, L., Dombi, Z., Csambalik, L., & Sípos, L. (2022). Characterizing the Spatial Uniformity of Light Intensity and Spectrum for Indoor Crop Production. *Horticulturae*, *8*(7), 644. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070644

Bamsey, M., Graham, T., Thompson, C., Berinstain, A., Scott, A., & Dixon, M. (2012). Ion-Specific Nutrient Management in Closed Systems: The Necessity for Ion-Selective Sensors in Terrestrial and Space-Based Agriculture and Water Management Systems. *Sensors*, *12*(10), 13349–13392. https://doi.org/10.3390/s121013349

Bannon, S., Thomas, J., Webster, R. J., & Whitby, H. (2026). Temporal Variation of Nutrient Ratios Within Hydroponic Nutrient Solutions. *Food and Energy Security*, *15*(2). https://doi.org/10.1002/fes3.70220

Bilodeau, S. E., Wu, B.-S., Rufyikiri, A.-S., MacPherson, S., & Lefsrud, M. (2019). An Update on Plant Photobiology and

Implications for Cannabis Production. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 296. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00296

Blasco, X., Martínez, M., Herrero, J. M., Ramos, C., & Sanchis, J. (2007). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and Electronics in Agriculture*, *55*(1), 49–70. https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.001

Blaud, P. C., Haurant, P., Chevrel, P., Claveau, F., & Mouraud, A. (2023). Multi-flow optimization of a greenhouse system: A hierarchical control approach. *SPIRE - Sciences Po Institutional REpository*, *351*, 121840. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121840

Blom, T., Jenkins, A., & Dobbelsteen, A. van den. (2023). Synergetic integration of vertical farms and buildings: reducing the use of energy, water, and nutrients. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1227672

Both, A. J., Benjamin, L., Franklin, J. F., Holroyd, G. H., Incoll, L. D., Lefsrud, M., & Pitkin, G. (2015). Guidelines for measuring and reporting environmental parameters for experiments in greenhouses. *Plant Methods*, *11*(1), 43. https://doi.org/10.1186/s13007-015-0083-5

Bugbee, B. (2004). NUTRIENT MANAGEMENT IN RECIRCULATING HYDROPONIC CULTURE. *Acta Horticulturae*, *648*, 99–112. https://doi.org/10.17660/actahortic.2004.648.12

Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Meneghello, D., Martin, M., Pennisi, G., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2023). Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing syste

ms, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation. *Agricultural Water Management*, *285*, 108365. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108365

Ceccarelli, M., Bovo, M., Santolini, E., Tassinari, P., Torreggiani, D., & Barbaresi, A. (2024). *Enhancing Sensor Precision Through Calibration: A Case Study in Agricultural Monitoring Systems*. 366–370. https://doi.org/10.1109/metroagrifor63043.2024.10948761

Cerozi, B. da S., & Fitzsimmons, K. (2016). The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technology*, *219*, 778–781. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.079

Chaichana, C., Chantrasri, P., Wongsila, S., Wicharuck, S., & Fongsamootr, T. (2020). Heat load due to LED lighting of indoor strawberry plantation. *Energy Reports*, *6*, 368–373. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.089

Chen, W., Decardi-Nelson, B., Kubota, C., & You, F. (2025). AI Applications in the Environmental Control of Controlled Environment Agriculture in the Digital Age. *Modern Agriculture*, *3*(2). https://doi.org/10.1002/moda.70027

Cho, W. J., Kim, H.-J., Jung, D.-H., Kang, C. I., Choi, G.-L., & Son, J. E. (2017). An Embedded System for Automated Hydroponic Nutrient Solution Management. *Transactions of the ASABE*, *60*(4), 1083–1096. https://doi.org/10.13031/trans.12163

Choi, E. J., Lee, D., & Lee, S. M. (2025b). Performance evaluation of the efficient cooling and desiccant dehumidification system for a plant factory. *Building Simulation Conference Proceedings*, *19*. https://doi.org/10.26868/25222708.2025.1872

Detering, T., Germer, J., & Asch, F. (2026). Effect of Vapor Pressure Deficit on Nutrient Uptake and Growth of Four Tomato Varieties Grown Hydroponically at Low Nutrient Concentrations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. https://doi.org/10.1002/jpln.70049

Fletcher, R. S., & Fisher, D. K. (2021). Testing an Open-Source Multi Brand Sensor Node to Monitor Variability of Environmental Conditions inside a Greenhouse. *Agricultural Sciences, 12*(3), 159–180. https://doi.org/10.4236/as.2021.123011

Gargaro, M., Hastings, A., Murphy, R., & Harris, Z. M. (2024). A cradle-to-customer life cycle assessment case study of UK vertical farming. *Journal of Cleaner Production, 470*, 143324. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143324

Gillani, S. A., Abbasi, R., Martínez, P., & Ahmad, R. (2023). Comparison of Energy-use Efficiency for Lettuce Plantation under Nutrient Film Technique and Deep-Water Culture Hydroponic Systems. *Procedia Computer Science, 217*, 11–19. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.197

Goldstein, B., Hauschild, M. Z., Fernández, J., & Birkved, M. (2016). Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. *Journal of Cleaner Production, 135*, 984–994. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.004

Ivey, M. L. L., Mensah, A. A., Diekmann, F., & Ilić, S. (2025). Food Safety in Hydroponic Food Crop Production: A Review of Intervention Studies to Control Human Pathogens. *Foods, 14*(13), 2308. https://doi.org/10.3390/foods14132308

Jin, W., Urbina, J. L., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2021). Adding Far-Red to Red-Blue Light-Emitting Diode Light Promotes Yield of Lettuce at Different Planting Densities.

Frontiers in Plant Science, *11*, 609977. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609977

Joensuu, K., Kotilainen, T., Räsänen, K., Rantanen, M., Usva, K., & Silvenius, F. (2024). Assessment of climate change impact and resource-use efficiency of lettuce production in vertical farming and greenhouse production in Finland: a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *29*(10), 1932–1944. https://doi.org/10.1007/s11367-024-02343-5

Jurga, A., Pacak, A., Pandelidis, D., & Kaźmierczak, B. (2022). Condensate as a water source in terrestrial and extra-terrestrial conditions. *Water Resources and Industry*, *29*, 100196. https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100196

Kaya, C. (2025). Intelligent Environmental Control in Plant Factories: Integrating Sensors, Automation, and AI for Optimal Crop Production. *Food and Energy Security*, *14*(1). https://doi.org/10.1002/fes3.70026

Kozai, T. (2013). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy Series B*, *89*(10), 447–461. https://doi.org/10.2183/pjab.89.447

Lefers, R., Bettahalli, N. M. S., Fedoroff, N. V., Ghaffour, N., Davies, P. A., Nunes, S. P., & Leiknes, T. (2019). Hollow fibre membrane-based liquid desiccant humidity control for controlled environment agriculture. *Biosystems Engineering*, *183*, 47–57. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.010

Lin, D., Zhang, L., & Xia, X. (2020). Hierarchical model predictive control of Venlo-type greenhouse climate for improving energy efficiency and reducing operating cost. *Journal of*

Cleaner Production, *264*, 121513. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121513

Mahmood, F., Govindan, R., Bermak, A., Yang, D., Khadra, C., & Al-Ansari, T. (2021). Energy utilization assessment of a semi-closed greenhouse using data-driven model predictive control. *Journal of Cleaner Production*, *324*, 129172. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129172

Martin, M., Elnour, M., & Siñol, A. C. (2023). Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm. *Sustainable Production and Consumption*, *40*, 182–193. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.020

Matysiak, B., Ropelewska, E., Wrzodak, A., Kowalski, A., & Kaniszewski, S. (2022). Yield and Quality of Romaine Lettuce at Different Daily Light Integral in an Indoor Controlled Environment. *Agronomy*, *12*(5), 1026. https://doi.org/10.3390/agronomy12051026

Miserocchi, L., & Franco, A. (2024). Benchmarking energy efficiency in vertical farming: Status and prospects. *Thermal Science and Engineering Progress*, *58*, 103165. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103165

Moore, M. R., Yang, T., Douraki, M. J., Rivard, C. L., Pliakoni, E. D., Nwadike, L., & Bhullar, M. (2025). Effect of Ultraviolet Water Treatment on Survival and Growth of Escherichia coli in Recirculating Hydroponic Systems. *Journal of Food Protection*, *88*(9), 100575. https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100575

Nelson, J. A., & Bugbee, B. (2014). Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures. *PLoS ONE*, *9*(6). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010

Nițu, O. A., Ivan, E. Ș., Tronac, A., & Arshad, A. (2024). Optimizing Lettuce Growth in Nutrient Film Technique Hydroponics: Evaluating the Impact of Elevated Oxygen Concentrations in the Root Zone under LED Illumination. *Agronomy*, *14*(9), 1896. https://doi.org/10.3390/agronomy14091896

Osman, A. I., Redpath, D., Lichtfouse, É., & Rooney, D. W. (2023). Synergy between vertical farming and the hydrogen economy. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(1), 1–6. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01648-5

Palmer, S. R., & Iersel, M. W. van. (2020). Increasing Growth of Lettuce and Mizuna under Sole-Source LED Lighting Using Longer Photoperiods with the Same Daily Light Integral. *Agronomy*, *10*(11), 1659. https://doi.org/10.3390/agronomy10111659

Pennisi, G., Gianquinto, G., Marcelis, L. F. M., Martin, M., & Orsini, F. (2025). Vertical farming: productivity, environmental impact, and resource use. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *45*(5). https://doi.org/10.1007/s13593-025-01055-w

Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernández, J. A., Stanghellini, C., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (Lactuca sativa L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports*, *9*(1), 14127. https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z

Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., & Cesco, S. (2019). Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems: Issues and Opportunities in a

Smart Agriculture Perspective. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 923. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923

Sandison, F., Yeluripati, J., & Stewart, D. (2022). Does green vertical farming offer a sustainable alternative to conventional methods of production?: A case study from Scotland. *Food and Energy Security*, *12*(2). https://doi.org/10.1002/fes3.438

Sanna, F., Deboli, R., & Calvo, A. (2018). Variability of tomato in protected environment in response to meteorological parameters. *Plant Soil and Environment*, *64*(6), 247–254. https://doi.org/10.17221/772/2017-pse

Schipper, R., Meer, M. van der, Visser, P. H. B. de, Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2023). Consequences of intra-canopy and top LED lighting for uniformity of light distribution in a tomato crop. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1012529. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1012529

Sela, S., Rodov, V., Kenigsbuch, D., & Bar-Tal, A. (2023). Hydroponic Agriculture and Microbial Safety of Vegetables: Promises, Challenges, and Solutions. *Horticulturae*, *9*(1), 51. https://doi.org/10.3390/horticulturae9010051

Sharmin, S., Hossan, Md. S., & Uddin, M. S. (2025). A review of machine learning approaches for predicting lettuce yield in hydroponic systems. *Smart Agricultural Technology*, *11*, 100925. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100925

Sheibani, F., Bourget, M., Morrow, R. C., & Mitchell, C. A. (2023). Close-canopy lighting, an effective energy-saving strategy for overhead sole-source LED lighting in indoor farming. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1215919. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1215919

Strob, M., Ufitikirezi, J. de D. M., Olšan, P., Zoubek, T., Bumbálek, R., Filip, M., Jech, R., Liška, M., Kuneš, R., & Bartoš, P.

(2026). Design and validation of an inline conductometric measurement instrument for hydroponic nutrient solutions. *Flow Measurement and Instrumentation*, *110*, 103325. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2026.103325

Tham, C. A. T., Zwe, Y. H., Ten, M. M. Z., Ng, G. S. Y., Toh, J. Y. L., Poh, B. L., Zhou, W., & Li, D. (2024). Sanitization of hydroponic farming facilities in Singapore: what, why, and how. *PubMed Central*, *90*(7). https://doi.org/10.1128/aem.00672-24

Tsunedomi, A., Miyawaki, K., Masamura, A., Nakahashi, M., Mawatari, K., Shimohata, T., Uebanso, T., Kinouchi, Y., Akutagawa, M., Emoto, T., & Takahashi, A. (2018). UVA-LED device to disinfect hydroponic nutrient solution. *The Journal of Medical Investigation*, *65*, 171–176. https://doi.org/10.2152/jmi.65.171

Velde, E. V. de, Steppe, K., & Labeke, M. V. (2023). Leaf morphology, optical characteristics and phytochemical traits of butterhead lettuce affected by increasing the far-red photon flux. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1129335. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1129335

Vovna, O., Laktionov, I., Koyfman, O. O., Stashkevych, I., & Lebediev, V. A. (2020). Study of metrological characteristics of low-cost digital temperature sensors for greenhouse conditions. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, *17*(1), 1–20. https://doi.org/10.2298/sjee2001001v

Walter, A., & Schöbel, H. (2023). Shed light on photosynthetic organisms: a physical perspective to correct light measurements. *Photosynthesis Research*, *156*(3), 325–336. https://doi.org/10.1007/s11120-023-01001-5

Weidner, T., Yang, A., & Hamm, M. W. (2021). Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different

climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, *243*, 114336. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114336

Xu, L., & Hu, Q. (2007). A Multi-Objective Compatible Control (MOCC) Algorithm for the Greenhouse Energy-Saving Control. *2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007*. https://doi.org/10.13031/2013.22944

Zhang, Y., Chen, C., Fang, H., & Tong, Y. (2025). Improving Air Distribution Within Lettuce Plant Canopy by Employing Double-Channel Ventilation Cultivation System: Simulation and Experiment Study. *Agronomy*, *15*(10), 2326. https://doi.org/10.3390/agronomy15102326

Zhang, Y., Yasutake, D., Hidaka, K., Okayasu, T., Kitano, M., & Hirota, T. (2022). Crop-localised CO2 enrichment improves the microclimate, photosynthetic distribution and energy utilisation efficiency in a greenhouse. *Journal of Cleaner Production*, *371*, 133465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133465

Zhen, S., & Bugbee, B. (2020). Substituting Far-Red for Traditionally Defined Photosynthetic Photons Results in Equal Canopy Quantum Yield for CO2 Fixation and Increased Photon Capture During Long-Term Studies: Implications for Re-Defining PAR. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 581156. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.581156


BİDGE