

TARIM MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ BİLİMİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR



Editör
MAKSUT BARIŞ EMİNOĞLU



BİDGE Yayınları

Tarım Makinaları ve Teknolojileri Biliminde Yeni Yaklaşımlar

Editör: MAKSUT BARIŞ EMİNOĞLU

ISBN: 978-625-8567-45-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Tarım Makinaları ve Teknolojileri Biliminde Yeni Yaklaşımlar

ÖNSÖZ

Günümüzde iklim değişikliğinin üretim sistemlerine etkisi, nüfus artışı ve göç hareketleri, savaşlar, küresel pandemiler, gıda güvenliği gibi etkenler tarım sektörüne yön vermektedir. İnsanlık tarihi boyunca artan insan nüfusunun beslenmesi, bitkisel ve hayvansal üretimde verimliliğin artırılması, tarımsal faaliyetlerde enerji ve teknoloji kullanımının artmasına neden olmuştur.

“Tarım Makinaları ve Teknolojileri Biliminde Yeni Yaklaşımlar” başlıklı bu eser ile alanında uzman akademisyenler ve araştırmacılar, tecrübe ve bakış açılarını yansıttıkları çalışmalarını literatüre kazandırmışlardır.

Bu kitabın hazırlanmasında emeği geçen mizanpaj ve dizgi ekibine, saygıdeğer yazarlarımıza ve bilimsel katkılarıyla yayının niteliğini artıran hakemlerimize en içten teşekkürlerimizi sunarız.

Tarım makinaları ve teknolojileri bilimine katkı sağlaması ve yeni araştırmalara ilham vermesi dileğiyle...

İÇİNDEKİLER

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) AND REMOTE SENSING IN PLANNING IRRIGATION SYSTEMS	1
<i>NAMIK KEMAL SÖNMEZ</i>	
HASSAS TARIMDA DON KORUMA SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU	26
<i>ARDA BEKCAN, AHMET ÇOLAK</i>	
YAPRAK MİKROYAPISI, ISLANABİLİRLİK VE SURFAKTAN GEÇİŞİ ARASINDAKİ İLİŞKİ	36
<i>MUHAMMED CEMAL TORAMAN, MEDENİ KARAKAYA</i>	
FORAGE HARVESTERS	77
<i>MAKSUT BARIŞ EMİNOĞLU, UFAK TÜRKER</i>	

BÖLÜM 1

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) AND REMOTE SENSING IN PLANNING IRRIGATION SYSTEMS

NAMIK KEMAL SÖNMEZ¹

Introduction

Turkey is located between semi-arid and arid climate zones, and agricultural production is largely dependent on irrigation. Irregularities in the seasonal and spatial distribution of rainfall increase the strategic importance of water in agricultural production, especially in the Central Anatolia, Southeastern Anatolia, and Mediterranean regions. According to data from the General Directorate of State Hydraulic Works (DSİ), the technically irrigable agricultural land in Turkey is approximately 26 million hectares. However, the amount of land irrigated with modern and efficient irrigation systems is considerably lower than this potential. Climate change scenarios indicate an increase in temperature, a decrease in rainfall, and an increase in the frequency of droughts in Turkey, which is located in the Mediterranean Basin. This situation necessitates the more efficient, planned, and sustainable

¹Prof. Dr., Akdeniz University, Faculty of Science, Department of Space Sciences and Technologies. ORCID: 0000-0001-6882-0599¹

management of existing water resources. In the planning of irrigation systems, classical methods are often insufficient to represent large areas and cannot adequately reflect spatial and temporal variability.

In this context, Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) stand out as powerful tools in data generation, analysis, and decision support processes in irrigation planning. Thanks to satellite data and GIS-based analyses, water resources, soil characteristics, plant growth, and land use can be evaluated with a holistic approach.

The development and utilization of land and water resources are of immense importance in solving the country's economic and social problems. However, Türkiye faces numerous economic, social, and cultural problems related to the use of these resources. Today, compared to the 2000s, only about 19% of irrigable areas are being irrigated; 60% of surface water resources and 27% of groundwater potential remain unused. It has become clear that Turkey's water resources (113 km³/year) are insufficient for all irrigable areas under current conditions; and that serious water shortages will be experienced in the near future due to water basin pollution, climate change, population growth, and industrial development, and that water resources will become increasingly saline.

Under these conditions, measures such as finding new water sources and new plant varieties resistant to salt and water stress should be taken now. In Türkiye, as in other branches of agriculture, research on irrigation and drainage issues does not stem from national needs. Personnel policies in public research institutions are flawed and inadequate. They are significantly affected by the political environment. Finding qualified research assistants in universities is becoming increasingly difficult due to economic and

social reasons. Irrigation research is carried out solely with the support of public institutions.

Irrigation water management is based on a highly complex foundation encompassing plant, soil, and climate factors. Many methods have been developed to determine or estimate when and how much irrigation water any given plant needs and/or how much water is consumed by the plant during a growing season . Recently, Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) techniques have come to the forefront among plant monitoring methods. Widely used, GIS technology is also finding application in the agricultural sector, which is economically and socially important and requires technological advancements. GIS programs, which can make significant contributions to the decision-making process, can be useful in making effective decisions in the implementation of agricultural policies. Indeed, Article 6 of the Agricultural Law No. 5488, enacted in 2006, which addresses the priorities of agricultural policies, includes the establishment and use of agricultural information systems. In Turkey, the importance of information systems has been understood in every field, and serious studies have begun to be carried out to the extent that they are included in the laws (Anonymous 2006).

GIS technology, which plays a significant role in decision-making mechanisms, provides considerable benefits in the national and international policies of a country. GIS is also effective in agricultural improvement, identifying diseased areas of vegetation, and agricultural taxation by using satellite imagery to detect agricultural areas.

In the preparation of irrigation projects, various methods are used to determine the quality and quantity of agricultural lands and to subject these lands to a certain evaluation. Because these methods

are quite expensive and time-consuming, in recent years, these processes can be carried out using geographic information systems (GIS) and remote sensing science and technology. In these studies, test areas are selected in a grid format according to a certain sampling rate in the regions to be estimated. The size of these test areas may vary depending on the structure of the area and the purpose of the study. Fieldwork is carried out by experienced personnel, and data is collected for the lands within that area to create a database. In addition, satellite data for the entire area is also evaluated. By using both techniques and technologies, the quality and quantity of the entire land can be determined. In this context, datasets created with GIS allow for studies on various topics. One of these studies is the preparation of irrigation projects for the land.

Geographic Information Systems and Remote Sensing

Remote sensing generally began to develop in the 1960s. From its inception to the present day, agriculture has been considered one of the primary users of remotely sensed data (Bauer, 1975:271; Tucker, 1979:127). According to recent research, much of the information needed for managing agricultural systems is obtained through various remote sensing sensors. When used in conjunction with global positioning system (GPS) receivers, computers, geographic information systems (GIS), and crop simulation models, remote sensing technologies have considerable potential in agricultural production.

Remote sensing techniques based on satellite imagery can provide important information, especially in observing seasonal changes in plant and soil conditions. However, depending on the equipment used, there are some limiting factors such as the perception of images with fixed spectral bands, low resolution, long imaging periods, and the time it takes for the image to reach the user

(Atkinson & Curran , 1997:1345; Justice et al., 1998:1228; Gao et al., 2006:250).

Remote sensing techniques allow for monitoring the growth of plants, both at the field level using handheld radiometers and from the air using various instruments. In addition, some components of the surface energy balance can be detected via remote sensing . In particular, determining surface temperature using remote sensing methods allows for the temporal and spatial calculation of evaporation from plant and soil systems through surface energy balance-based approaches (Allen et al., 2007:4). Furthermore, research has shown strong statistical relationships between the vegetation coefficient and spectral vegetation indices (Neale & Crowther , 1994:491; Bausch , 1995:55). Thanks to remote sensing-based water stress and vegetation indices developed to determine plant water stress, irrigation timing and irrigation water requirements can be determined spatially and temporally (Jackson et al., 1981:1133; Allen et al., 2007:380).

The potential of land for agricultural use can be defined by soil, climate, and topographical factors. Determining this potential is a necessary step for agricultural advancements. Furthermore, accurate identification and determination of existing and potential production areas are essential for agricultural development and research.

These factors have a significant impact on agricultural technology transfer. GIS plays an important role in identifying potential production areas because it has the ability to perform many tasks using both spatial and qualitative data. One of the most important features of GIS is its ability to overlay different layers or maps (Goodchild , 1992 :31).

In a GIS database, data from many different sources related to the subject being analyzed and queried (processed or raw satellite data, climate, soil, terrestrial measurements, altitude, precipitation, temperature, population, roads, etc.) are stored on the computer in layers. GIS gains more advanced analytical and decision-making/planning/monitoring capabilities by preparing up-to-date data and other necessary information obtained using remote sensing technology in layers (Yomralioğlu , 2010).

Geographic information systems (GIS) technology is a new discipline that has developed in the last 20-30 years. Initially developed to store existing maps on computers, it has later evolved to its current powerful and indispensable position by being able to query and analyze satellite imagery and other graphic and related verbal information together.

In recent years, Geographic Information Systems (GIS) techniques have been widely used in land assessment and database creation processes. GIS is a system of hardware, software, and methods that encompasses the processing, analysis, modeling, and visualization of data from areas with defined locations on the Earth's surface for evaluation in a computer environment. GIS is an effective tool that enables the creation of such databases and the performance of necessary analyses . By using geographic information systems and remote sensing-supported systems, land assessments can be carried out more rationally, and more realistic land use plans can be prepared (Burrough & McDonnell, 1998; Goovaerts , 1997; Malczewski , 2006:3).

Key Factors in Planning Irrigation Systems

The considerations in planning irrigation systems should be divided into two main categories. The first is the considerations to be considered when planning the irrigation of large agricultural areas, and the second is the considerations to be taken into account when planning the irrigation of relatively small recreational areas (FAO, 1989). Remote sensing and geographic information systems provide significant benefits in irrigation system planning studies, especially in the planning of irrigation systems for large agricultural areas.

Irrigation system, factors such as land dimensions, irrigation water potential and plant water requirements, land use pattern, topographic structure, groundwater level, evapotranspiration level, drainage status, and regional climate characteristics must be known. Remote sensing and geographic information systems have become prominent in recent years for obtaining this data and evaluating it under a single database.

Irrigation Water Potential and Plant Water Requirements

In Türkiye, the majority of irrigation projects rely on surface water resources. Irrigation networks operated through dams, ponds, and regulators are concentrated particularly in the Southeastern Anatolia Project (GAP), the Gediz Basin, the Büyük Menderes Basin, and the Konya Closed Basin. Accurate determination of water potential in these areas is critical for the sustainability of the projects.

Determining plant water requirements is a fundamental component of irrigation planning. Remote sensing-based approaches allow for the spatial and temporal estimation of plant water stress and actual evapotranspiration (ET_a) using surface temperature and

spectral vegetation indices (Bastiaanssen et al., 1998:212; Allen et al., 2007:4). Many studies in Turkey have successfully applied these methods to common crops such as cotton, maize, wheat, and citrus fruits (Ünlü et al., 2010:212; Gürsoy & Akça, 2015:187).

In irrigation water management, knowing when and how much water a plant needs is fundamental, and while determining the temporal and spatial variations of this information is impossible with traditional methods when the irrigation area is large and the plant pattern is complex, it becomes possible with the use of remote sensing techniques. Furthermore, plant growth levels and yield amounts can be estimated using remotely sensed data. Remote sensing is an important decision support tool, especially in irrigation networks, for ensuring the equitable distribution and fair use of water among users and for evaluating project performance.

In irrigation water management, two distinct pieces of information based on remote sensing stand out: infrared surface temperature and spectral indices. The difference between infrared surface temperature and atmospheric temperature is an indicator of water stress in plants, as well as a crucial component of energy balance and evaporation calculations. The most well-known water stress indices based on $T_c - T_a$ are SDD, CWSI, and WDI . Tested in numerous field trials and found to be effective, these indicators reveal the temporal and spatial variation of water stress and can be used to determine when a plant needs water, as well as being useful tools in yield estimation. ET_c , determined based on energy balance using $T_c - T_a$, is important for determining the amount of water applied in an irrigation area and can also be used in irrigation timing planning, water budgeting, and irrigation efficiency calculations.

Spectral vegetation indices are more effective in revealing the effects of water stress on plant growth and biophysical properties

than in directly determining water stress. This underlies the statistically significant relationships reported in numerous studies between surface-air temperature difference ($T_c - T_a$) based water stress indices and spectral indices (Jackson et al., 1981:1133). Consequently, the direct use of spectral indices in irrigation water planning may not always provide the desired level of accuracy.

However, the ability to estimate plant characteristics such as leaf area index (LAI), canopy density, and dry matter using spectral indices offers significant advantages in determining growth retardation and yield reductions caused by water stress (Bausch , 1995:55). In addition, several studies have shown that spectral indices can be used to estimate soil heat flux (G), one of the surface energy balance components, through net radiation (Rn) and to distinguish soil and canopy contributions within Rn (Bastiaanssen et al., 1998:212; Allen et al., 2007:380).

Surface albedo can also be calculated using spectral indices, and this information constitutes an important input for evaporation models based on energy balance (Liang, 2001:213). Furthermore, numerous studies have shown that spectral indices can be used to estimate the vegetation coefficient (K_c) values, which are commonly used in calculating actual plant water consumption (ET_c). In particular, strong and statistically significant correlations have been reported between the basic vegetation coefficient (K_{cb}) and NDVI and similar spectral indices (Neale et al., 1989:491).

Thompson et al. (2006:147) investigated the applicability of soil matrix potential sensors (Watermark 200SS sensor) and electronic tensiometers for irrigation planning in melon and pepper plants irrigated by drip irrigation. The authors reported that both sensor types can be effectively used to monitor soil moisture dynamics when properly calibrated.

Soil Properties

Spatial variability, even over short distances, due to differences in topography, bedrock, climatic conditions, and land-use practices . Through Geographic Information System (GIS)-based soil information systems, data obtained from point-based soil analyses can be transformed into spatial distribution maps , enabling more accurate and effective irrigation and drainage planning . This approach significantly contributes to preventing and mitigating the risks of salinity and sodium content resulting from inappropriate irrigation practices .

Soil is a three-dimensional, three-phase (solid, liquid, and gas) dynamic system formed by the interaction of numerous physical, chemical, and biological variables. This complex structure leads to significant variations in soil properties over short distances. Indeed, in large-scale irrigation areas such as the Harran Plain, Lower Seyhan Plain, and Konya Plain, physical and chemical soil properties, including texture, hydraulic conductivity, and salinity, play a decisive role in the selection of appropriate irrigation methods. In this context, GIS stands out as one of the most suitable and effective tools for analyzing, interpreting, and evaluating such spatial variability within an integrated framework. GIS applications in soil science primarily focus on land-use planning, agricultural suitability analyses, and the sustainable management of natural resources, supporting both productivity enhancement and environmental protection goals. By importing various datasets such as soil maps, land capability classes, suitability classes for irrigation agriculture, agricultural land suitability status, and potential land-use groups as map layers into a GIS environment, ideal land use can be determined at the parcel level. Furthermore, these practices enable the development of appropriate management systems for each plot, including the preparation of production plans, the identification of

suitable crop patterns based on crop rotation systems, and the creation of multiple scenarios for rotation applications (Basayigit et al., 2004).

Soil information systems constitute a critical source of information for soil-related scientific disciplines. Traditional printed soil maps provide only static spatial information, which makes interpretation difficult and hinders data integration. In contrast, maps created within Geographic Information Systems (GIS), supported by digital databases , facilitate analysis and interpretation by integrating multiple soil properties such as slope, texture, pH, and organic matter on a single platform (McBratney et al., 2000:3).

From the perspective of sustainable plant production, soil is not merely a growing medium, but a dynamic system where physical, chemical, and biological processes interact. Physical soil properties such as texture, structure, water-holding capacity, and aeration directly affect root development, water movement, and nutrient transport. Similarly, chemical properties such as pH, cation exchange capacity, and nutrient balance are among the key factors determining the availability of nutrients to plants. Furthermore, soil biota —particularly microorganisms— plays a critical role in supporting plant production through processes such as organic matter mineralization, nitrogen fixation, and the regulation of nutrient cycles . Wu et al., 2021:545; Xing et al., 2025). In this context, production systems designed taking into account the physical, chemical, and biological properties of soils play a decisive role in increasing agricultural productivity. Indeed, the literature indicates that there are strong and significant relationships between soil health and crop yield, and it is emphasized that integrated soil management practices have positive effects on both yield and crop quality (Xing et al., 2025).

Land Use Pattern

The increasing global population and rising food demand have made the efficient management of soil nutrients, the sustainability of productivity, and the reduction of environmental costs increasingly important (Sobhy & Anandhi , 2025). Balanced management of soil nutrients not only increases productivity but also reduces environmental impacts by ensuring the optimal use of limited inputs such as water and fertilizers (Yimer & Tarnawa , 2025:19). In this context, simple management plans based solely on crop type-nutrient relationships can lead to yield and quality losses because they do not account for the spatial heterogeneity of soils and the spatial variability in nutrient balance (Sobhy & Anandhi , 2025:8477). Therefore, decision-makers should adopt detailed assessment approaches that consider the current soil nutrient status, resource-dependent variability, and sustainability goals. Ensuring global food security without disrupting agricultural ecological balances lies in the adaptation of new technologies, particularly those integrated with methods such as Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS).

In Turkey, the implementation of irrigation investments has led to significant changes in land use patterns in many plains. Studies conducted in the Bursa-Mustafakemalpaşa, Gediz, and Harran plains reveal that irrigated agricultural areas have expanded and crop patterns have diversified after irrigation. Remote sensing and GIS techniques are effectively used in monitoring these changes and evaluating the effects of irrigation on agricultural production.

Topography

The digital representation of topography is called a Digital Elevation Model (DEM). Automatically obtaining basin topographic

data from DEMs provides faster, less subjective, and more reproducible measurements compared to traditional methods applied to topographic maps (Tribe , 1992:263). Digital data produced using this approach has the advantage of being easily retrieved and analyzed by Geographic Information Systems (GIS). This technological advantage is provided by GIS. The increasing use and quality of DEMs have expanded their application potential to hydrology, hydraulics, water resources, and environmental research (Moore et al., 1991:443).

A digital elevation model (DEM) is a suitable structure for representing the constantly changing topographic surface of the Earth. This model is a general data source for terrain analysis and other 3D applications. The widespread use of digital topographic data, the increasing outputs obtained from DEMs , and the list of things that can be done with DEM models highlight the importance of DEMs (Thomson et al., 2001:67). General terrain features such as terrain slope, terrain aspect, terrain curvature, watershed area, and slope length can be easily calculated from DEMs (Moore et al., 1993). Digital elevation models have many applications in hydrological, geomorphological, and biological studies (Moore et al., 1991:443). With DEM applications, it is possible to determine the slope of the terrain, slope direction, reflection angle, drainage networks, watershed boundaries, flow paths, and points within the field of view, to generate stereo image pairs, and to create a 3D mesh structure of the Earth's surface.

Digital Elevation Models (DEMs) are widely used to determine the slope, aspect, and drainage characteristics of land. In Turkey, the variability of topography over short distances makes slope analysis essential in the planning of irrigation systems. GIS-supported topographic analyses offer significant advantages in

selecting the appropriate irrigation method and assessing erosion risk.

Groundwater and Drainage

Today, commercial GIS software is increasingly being used in groundwater modeling, soil mapping, and many other related fields. Thanks to advancements in GIS software, geostatistical analysis studies can now be integrated with GIS. GIS does not eliminate the time-consuming data collection phase in a study, but it can evaluate spatial changes more effectively and quickly (Burrough & McDonnell, 1998; Goovaerts , 1997; Malczewski , 2006:3).

are leading to rising groundwater levels and related salinity and sodium content problems in many irrigated areas of Turkey. Approximately 3 million hectares of land in Turkey suffer from drainage problems. These drainage problems, in turn, bring about environmental issues such as salinity and sodium content . Around 1.5 million hectares in Turkey have salinity and sodium content problems, which is equivalent to approximately 31% of irrigated land. Factors such as irrigation, drainage, soil characteristics, physiography , and climate significantly influence soil salinization and sodium content . Serious salinity problems exist in the Harran, Amik, Konya, and Lower Seyhan Plains, where these factors are favorable.

spatial distribution of groundwater depth and quality can be mapped using GIS and geostatistical methods, enabling the identification of priority areas for drainage investments. Geostatistics has rapidly expanded in parallel with advances in computer technology and increased computational capacity, becoming an effective analytical technique that allows for the

generalization and prediction of land properties using statistical dependencies between spatial data. This approach contributes to the more accurate and reliable determination of spatial relationships between parameters, while providing significant savings in time, labor, and cost in field studies (Govaerts , 1997; Webster & Oliver, 2007). The studies conducted by Çetin and Diker (2003:343) focused on the spatial assessment of changes in groundwater levels and the identification of areas affected by drainage problems.

Evapotranspiration

In satellite-based remote sensing approaches, evaporation-transpiration (ET) estimation utilizes surface albedo , leaf area index (LAI), and vegetation-related structural parameters derived from multispectral satellite data. In this process, reflectance values recorded in different spectral bands are correlated with spectroradiometric data obtained from field measurements, and the spatial and temporal distribution of actual evaporation-transpiration is estimated through empirical or quasi-physical models. When combined with energy balance-based models, these methods enable reliable estimation of ET in agricultural areas (Bastiaanssen et al., 1998:212; Allen et al., 2007:380; Su, 2002:85).

Climate

Agricultural modeling studies require a wide variety of spatial and thematic data layers, including soil properties, topography, climate variables, administrative boundaries, water bodies, geology, soil moisture regimes, irrigable areas, land use/land cover, forested areas, production systems, plant ecological requirements, and population data . Among these data components, climate data plays a decisive role in crop production planning, yield estimation, and risk analysis. In particular, climate variables such as

temperature, precipitation, evaporation, and radiation are indispensable inputs for solving agricultural problems addressed at different spatial and temporal scales (Jones et al., 2003:235; Challinor et al., 2009:2775; FAO, 2011).

Climate data constitutes one of the fundamental inputs in the development and application of agricultural models. However, the limited availability of high-resolution and reliable observational data, the sparse distribution of meteorological station networks, the insufficient temporal and spatial resolution of climate information in existing databases, and uncertainties associated with interpolation processes are among the main factors limiting the accuracy of agricultural modeling studies. To improve the efficiency of agricultural practices, enable scenario-based modeling, and ensure the reliability of model outputs, there is a growing need for up-to-date, high-resolution, and spatially continuous layers of climate data. Climate parameters can exhibit significant variability over short distances in areas with complex topography and are influenced by numerous environmental factors such as vegetation, water bodies, orientation, altitude, and geographical location. Such spatial variations... Representing variability solely through direct observations requires very dense meteorological station networks, which are often impractical due to economic and logistical constraints. Consequently, constructing spatially continuous layers of climate data from point meteorological observations using interpolation and modeling techniques has become a widely adopted alternative approach (Daly et al., 2002:99; Hijmans et al., 2005:1965; Jones et al., 2003:235).

Parallel to advances in computer technologies enabling the application of hydrological, ecological, and natural resource models within Geographic Information Systems (GIS), the demand for spatially accessible climate datasets in digital format has increased

significantly. Spatial climate data obtained from the interpolation of point meteorological observations using various techniques are widely used in many disciplines, including ecological modeling, hydrology, epidemiology, agriculture, and climate research. Climate maps can be analyzed in GIS environments along with various datasets, particularly those related to irrigation projects, soil properties, plant water stress indicators, productivity metrics, and yield estimates; thus, the application of agricultural climate models for many crop types is facilitated by the inclusion of temperature and drought threshold values. In particular, determining the spatial distribution of precipitation is a fundamental starting point for hydrometeorological modeling studies. In this context, statistical and geostatistical techniques used for climate data interpolation , together with digital elevation models (DEMs), make significant contributions to converting point rainfall measurements into usable, high-resolution rainfall datasets (Daly et al., 2002:99; Hijmans et al., 2005:1965; Hengl et al., 2007:1301).

Conclusion and Recommendations

GIS-based decision support systems provide significant advantages to decision-makers in the planning, implementation, and operation phases of irrigation projects. These systems enable spatial analysis of water resources, monitoring of irrigated areas, and more efficient management of water distribution. In Turkey, the increasing adoption of GIS infrastructure in irrigation and basin management projects implemented by the State Hydraulic Works (DSI) and the Ministry of Agriculture and Forestry has contributed to a more equitable, efficient, and sustainable use of water resources (DSI, 2019; FAO, 2017).

However, various technical, institutional, and economic constraints hinder the widespread implementation of GIS and remote

sensing-based irrigation planning in Turkey. Major limitations include inadequate data standardization, a shortage of qualified technical personnel, and difficulties in inter-institutional coordination. Nevertheless, advancements in satellite technologies, increased spatial resolution, and the growing availability of open data platforms offer significant opportunities to overcome these limitations.

In conclusion, remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) have become indispensable tools for the planning and management of irrigation systems in Turkey. Widespread adoption of these technologies nationwide is critical for the sustainable management of water resources and the enhancement of agricultural productivity. For the future, the development of GIS and remote sensing-based integrated agricultural information systems and their integration with institutional frameworks is strongly recommended.

References

Anonymous (2006). *Law No. 5488 on Agriculture* . Official Gazette, April 18, 2006, Issue: 26149.

Allen, R. G., Tasumi , M., & Trezza , R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))

Atkinson, P. M., & Curran , P. J. (1997). Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* , 63(12), 1345–1351.

Brady , N.C., & Weil , R.R. (2016). *Nature and Properties of Soils* . Pearson .

Basayigit , L., Öztekin, ME, Dingil, M. , Senol , S., & Dinç, U. (2004). *Land use plan on the basis of existing plots of the Konuklar state farm by using GIS. International Soil Congress on Natural Resource Management for Sustainable Development*, Erzurum, Turkey .

Bauer, M. E. (1975). The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops . *Advances in Agronomy* , 27, 271–304.

Bausch , W. C. (1995). Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn . *Agricultural Water Management*, 27(1–3), 55–68.

Burrough , P.A., & McDonnell, & R.A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems* . Oxford University Press .

Bastiaanssen , WGM, Menenti , M., Feddes , R.A., & Holtslag , AAM (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation . *Journal of Hydrology* , 212–213, 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)

Cetin M., & Diker K. (2003). assessing Drainage Problem Areas by GIS: A Case Study in the Eastern Mediterranean Region of Turkey . *Irrigation and Drainage* 52: 343–353.

Challinor , A. J., Ewert , F., Arnold, S., Simelton , E., & Fraser, E. (2009). crops and climate change : progress , trends , and challenges in simulating impacts and informing adaptation . *Journal of*

Experimental Botany , 60 (10), 2775–2789.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erp062>

Daly , C., Gibson, W. P., Taylor, G. H., Johnson, G. L., & Pasteris , P. (2002). A knowledge-based approach to the statistical Climate mapping . *Climate Research* , 22 , 99–113.
<https://doi.org/10.3354/cr022099>

DSI. (2019). *Irrigation management and modernization studies in Turkey* . DSI Publications, Ankara.

Di Wu , A.A., Andales , H.Y., Sun, Q., Chen, S., Guo , X., & Li , D. (2021). Linking crop water productivity to soil physical , chemical and microbial properties . *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* , 8(4), 545–558.

FAO (1989). *Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling* . FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.

FAO (2011). *Guide to agricultural meteorological practices* (WMO-No. 134). FAO–WMO.

FAO. (2017). *Irrigation modernization : Constraints and solutions* . FAO Water Reports No. 44.

Faust, M. (1989). *Physiology of Temperature Zone Fruit Trees* . Wiley .

Goodchild , M. F. (1992). geographical information science . *International Journal of Geographical Information Systems* , 6(1), 31–45

Goovaerts , P. (1997). *geostatistics for natural resources evaluation* Oxford University Press .

Gao , F., Masek , J., Schwaller , M., & Hall , F. (2006). on the blending of the Landsat and MODIS surface Reflectance : Predicting daily Landsat surface reflectance . *Remote Sensing of Environment*, 102(3–4), 250–262.

Gündoğdu, KS, Akkaya Aslan, Ş.T., Değirmenci, H., Demir, AO, Demirtaş, C., & Arıcı, İ., (2001). *Creating a GIS-Supported Database for Monitoring and Evaluating Irrigation Projects. I. National Irrigation Congress*, 8-11 November 2001, Antalya: 233-239.

Gürsoy, Ö. S., & Akça, E. (2015). Remote sensing-based estimation of actual evapotranspiration for irrigated crops in the Harran Plain . *Environmental Monitoring and Assessment* , 187: 421.

Havlin, J. L., Tisdale , S. L., Nelson, W. L., & Beaton , J. D. (2014). *soil Fertility and Fertilizers* . Pearson .

Hengl , T., Heuvelink , GBM, & Rossiter , D.G. (2007). About regression-kriging : From equations to case studies . *Computers & Geosciences* , 33 (10), 1301–1315. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001>

Hijmans , R.J., Cameron, S.E., Parra , J.L., Jones, P.G., & Jarvis , A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas . *International Journal of Climatology* , 25 (15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

Jackson, R.D. , Idso , S.B., Reginato , R.J., & Pinter , P.J. (1981). canopy temperature as a crop water stress indicator . *Water Resources Research* , 17(4), 1133–1138.

Jones, J. W., Hoogenboom , G., Porter, CH, Boote , K. J., Batchelor , WD, Hunt , LA, Ritchie , J. T. (2003). The DSSAT cropping System model. *European Journal of Agronomy* , 18 (3–4), 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

Justice , C. O., Vermote , E., & Townshend , J. R. G. (1998). the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research . *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 36(4) , 1228–1249.

Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo . *Remote Sensing of Environment* , 76, 213–238.

Lillesand , T.M., Kiefer , R.W., & Chipman , J.W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* . Wiley .

McBratney , AB, Mendonça Santos, ML, & Minasny , B. (2003). on digital soil mapping . *Geoderma* , 117 (1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

Mcbratney , AB, Odeh , IOA, Bishop , TFA, Dunbar , MS & Shatar , TM, 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey . *Geoderma* , 97 (34), 293–327 .

Malczewski , J. (2006). GIS- based multicriteria decision analysis : A survey of the literature . *International Journal of Geographical Information Science* , 20 (7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

Malczewski , J. (2004).GIS - based land-use suitability analysis : a critical overview . *Progress in Planning* , 62(1), 3–65.

Moore , D., Gessler , ID, Nielsen, P. E. & Peterson, G. A. (1993). soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Sci . soc . Am . J.* (57), 443-452.

Marschner , P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* . Academic Press .

Neale , C.M.U., & Crowther , J.M. (1994). An estimation of crop coefficient using spectral reflectance . *Transactions of the ASAE*, 37(2), 491–496.

Sobhy , D. M. & Anandhi , A. (2025). soil Nutrient Monitoring Technologies for Sustainable Agriculture , *Sustainability* , 17(18), 8477.

Su, Z. (2002). The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes . *Hydrology and Earth System Sciences* , 6(1), 85–100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>

Thompson, R.B., Gallardo , M., Valdez , L.C., & Ferna´ndez , M.D. (2007). Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetables crops using soil moisture sensors . *Agricultural Water Management*, (88) , 147–158

Thompson JA, Bell, JC & Butler , CA, (2001). Digital elevation model resolution : effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling . *Geoderma* , 100 (1-2), 67-89.

Tribe , A. (1992). Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models : a review and a new method ., *Journal of Hydrology* , 139 (1–4), 263-293.

Turner, D.P., Cohen, W.B., Kennedy, R.E., Fassnacht , K.S., & Briggs , J.M. (1999). relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites . *Remote Sensing of Environment*, 70(1), 52–68.

Tucker , CJ (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.

Ünlü, M., Kanber, R., Kapur , B., & Şahin, M. (2010). Estimating evapotranspiration of cotton using satellite-based surface energy balance . *Irrigation and Drainage* , 59(4), 403–415.

Webster, A. D., & Looney , N. E. (1996). *Cherries : Crop Physiology , Production and Uses* . CAB International.

Webster, R., & Oliver, M.A. (2007). *geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons .

Wójcik , P. (2004). “ Nutrition of apples trees .” *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research* , 12, 107–130.

Xing , Y., Wang, X., & Mustafa, A. (2025). exploring the link between soil health and crop Productivity . *Ecotoxicology and Environmental Safety* , 117703.

Yimer , A.H. & Tarnawa , A. (2025) Advancing Nutrient Management Strategies for Sustainable Crop Productivity in a Changing Climate : A Systematic Review , Wiley *The Scientific World Journal* , 19 p. <https://doi.org/10.1155/tswj/7101060> .

Yomralioğlu , T. (2010). *Geographic Information Systems: Basic Concepts and Applications*. Seçil Ofset, Trabzon.

BÖLÜM 2

HASSAS TARIMDA DON KORUMA SİSTEMLERİNİN ENTEGRASYONU

ARDA BEKCAN¹
AHMET ÇOLAK²

Giriş

Don olayları, tarım sektöründe ürün verimini ve kalitesini ciddi şekilde etkileyen en önemli risklerden biridir; özellikle ilkbahar aylarında beklenmedik şekilde düşen sıcaklıklar, tomurcuklanma ve çiçeklenme dönemindeki bitkiler için büyük bir tehdit oluşturur. Bitkilerin fizyolojik gelişimini durdurarak hücre yapılarının bozulmasına neden olur ve bu da rekolte kayıplarına yol açar. Bu nedenle, don koruma yöntemleri, modern tarımın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Çiftçiler, bitkilerini ani sıcaklık düşüşlerinden korumak için su püskürtme, rüzgâr makineleri ve özel örtü sistemleri gibi çeşitli stratejiler kullanır. Bu çabalar, giderek artan ve öngörülemez hale gelen küresel iklim değişikliği koşullarında daha da önem kazanmaktadır. Birleşmiş Milletlerin "İklim Değişikliği: Etkiler, Uyum ve Hassasiyet" raporunda vurgulandığı gibi, insan kaynaklı iklim değişikliğinin doğa ve insanlar üzerindeki yaygın ve tehlikeli etkileri, en savunmasız konumdaki insanları ve ekosistemleri orantısız bir şekilde etkilemektedir (COP27, 2022). Rapor, geri dönüşmez sonuçları önlemek için küresel ısınmayı 1.5°C ile sınırlandırmanın kritik olduğunu belirtirken, uyum (adaptasyon) stratejilerinin, özellikle tarım gibi iklimden doğrudan etkilenen sektörler için hayati bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, don koruma yöntemlerinin geliştirilmesi tarımın iklim değişikliğine uyum sağlaması için birincil ve zorunlu bir strateji haline gelmektedir. Bu değerlendirme Türkiye açısından da geçerlidir. Akdeniz ve karasal iklimlerin kesişiminde yer alması nedeniyle Türkiye’de de don olaylarına sıkça maruz kalınmakta ve özellikle erken çiçeklenme dönemindeki meyve türlerinde ciddi verim kayıpları meydana gelmektedir.

Don Koruma Yöntemleri

Pasif Yöntemler

¹ Arş. Gör. Arda BEKCAN, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5804-9358

² Prof. Dr. Ahmet ÇOLAK, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-5214-0644

Tarımda don koruması, pasif ve aktif yöntemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Pasif yöntemler, bir don olayını doğrudan engellemekten ziyade, donun riskini ve bitkiler üzerindeki etkisini azaltmak için uzun vadede uygulanan stratejilerdir. Aktif yöntemlerin aksine, genellikle enerji girişi gerektirmediklerinden düşük maliyetlidirler ve önceden planlama gerektirirler. Bu yöntemler, tarımsal üretimi iklim değişikliğinin getirdiği düzensiz hava koşullarına karşı daha dayanıklı hale getirmek için temel bir rol oynar; ancak ani sıcaklık düşüşlerinde etkinlikleri sınırlıdır.

Don riskini azaltmak için kullanılan pasif yöntemler, esasen doğal süreçleri ve kültürel uygulamaları yönetmeye dayanır. Öncelikle arazinin doğru seçimi kritik önem taşır; çünkü soğuk hava, yoğunluğu nedeniyle bir akışkan gibi davranarak eğimli arazilerden aşağı süzülür ve vadilerde ya da çukur alanlarda birikir. Bu nedenle, don ceplerinden uzak, yüksek rakımlı ve eğimli araziler tercih edilirken, soğuk hava akışını engelleyecek yoğun bitki örtüsü, çitler veya yapılar ortadan kaldırılmalı ya da düzenlenmelidir. Böylece soğuk hava drenajı sağlanarak bitki seviyesinde ısının korunması mümkün olur. Bunun yanı sıra, dona dayanıklı, geç çiçeklenen veya bölgeye özgü bitki tür ve çeşitlerinin seçilmesi don riskinin azaltılmasında uzun vadeli bir strateji sunar. Tropik veya hafif don riskli bölgelerde kanopi ağaçlarının kullanılması da etkili olabilir; zira bu ağaçlar gündüz toprağın ısınmasına izin verirken, gece yüzeyden yayılan ısının kaybolmasını engelleyerek doğal bir yorgan görevi görür. Don direncinin artırılmasında bitki besin yönetimi de hayati rol oynar. Özellikle potasyum ve fosforun yeterli seviyede olması, hücre özsuyu yoğunluğunu artırarak donma noktasını düşürürken, düzenli toprak analizi ve dengeli gübreleme programları bitkilerin dayanıklılığını güçlendirir. Buna ek olarak, hastalık ve zararlıların kontrol altında tutulması, bitkilerin stres seviyesini düşürerek dona karşı daha dirençli hale gelmelerini sağlar (Snyder ve Melo-Abreu, 2005).

Kültürel uygulamalar arasında budama teknikleri ve zamanlaması da önemli bir yere sahiptir. Uygun budama, bitki içindeki hava sirkülasyonunu artırarak soğuk havanın birikmesini önlerken, budamanın kış sonuna bırakılması çiçeklenmeyi geciktirerek ilkbahar donlarına karşı ek koruma sağlar. Bitki örtüleri de pasif koruma yöntemleri arasında sıkça kullanılır; saman, kumaş veya plastik gibi materyallerden yapılan örtüler gündüz depolanan ısının gece kaybolmasını engeller. Toprak işleme konusunda ise don riski olan dönemlerde toprağın sürülmesinden kaçınılmalıdır; çünkü gevşek toprak havayla dolarak yalıtkan etkisi yaratır ve gece boyunca ısı yayılımını azaltır. Bunun yerine sıkı ve işlenmemiş toprak tercih edilmeli, örtü bitkileri kaldırılarak soğuk havanın yüzeyde hapsolması engellenmelidir. Toprak neminin korunması da başka bir yöntemdir; suyun yüksek ısı kapasitesi sayesinde nemli toprak gündüz depoladığı ısıyı daha uzun süre muhafaza ederek gece sıcaklıklarının donma seviyesinin altına düşmesini yavaşlatır. Meyve ağaçlarının gövdelerinin beyaz boya ile boyanması veya özel sargılarla kaplanması ise gündüz aşırı ısınmayı engelleyerek gövdede çatlak oluşumunu önler ve bitkinin zayıf düşmesini engeller. Daha ileri bir pasif yöntem olarak, buz çekirdekleyici protein üreten bakterilerin (örneğin *Pseudomonas syringae*) popülasyonunu azaltmak da kullanılabilir; bu bakterilerin kontrolü, suyun daha düşük sıcaklıklarda donmasına imkân tanıyarak bitkilere ek bir direnç sağlar (Snyder ve Melo-Abreu, 2005).

Aktif Yöntemler

Aktif don koruma yöntemleri, don olayının meydana geldiği anda veya hemen öncesinde uygulanan, yüksek maliyetli ve enerji gerektiren müdahalelerdir. Bu yöntemler, donun bitkilere zarar vermesini engellemek için doğrudan ısı eklemeye veya hava sıcaklığını yükseltmeye odaklanır. Aktif yöntemler, pasif yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda ürün kaybını önlemek için hayati önem taşır (Snyder ve Melo-Abreu, 2005).

Isıtıcılar

Isıtıcılar, don riski bulunan alanlara yerleştirilen ve doğrudan çevresine ısı veren sistemler olup genellikle propan, doğal gaz veya sıvı yakıtlarla çalışırlar. Bu sistemler bitki etrafındaki havayı ısıtarak don oluşumunu engeller. En yüksek etkinin sağlanabilmesi için ısıtıcıların soğuk hava ceplerine ve stratejik noktalara yerleştirilmesi önemlidir. Geleneksel yöntemlerde sabit veya traktörle taşınan mobil ısıtıcılar kullanılmakta, ancak bu sistemler çoğu zaman ya fazla enerji tüketimine yol açmakta ya da yüksek ısı talebi olan bölgelerde yetersiz kalmaktadır. Günümüzde ise hareketli ve akıllı sistemler ön plana çıkmaktadır. Birden fazla mobil ısıtıcı, belirlenmiş patikalarda gezinerek daha geniş alanları ısıtabilmekte, hatta insansız kara araçları (UGV) ile entegre edilerek otomatik çalıştırılabilmektedir. Son yıllarda geliştirilen “hassas ısıtma stratejileri” sayesinde ısıtıcılar, gerçek zamanlı sensörler ve insansız hava araçlarından (UAV) elde edilen sıcaklık haritalarına göre yönlendirilmekte ve en çok don tehlikesi olan bölgeler öncelikli olarak korunmaktadır. Yapılan çalışmalar, bu tür dinamik yol planlama algoritmalarıyla don korumada hem yakıt tüketiminin hem de ısıtıcı sayısının %80–95 oranında azaltılabileceğini, aynı zamanda çiçek ve meyve gözlerinin korunma süresinin belirgin şekilde artırılabilceğini göstermektedir (Weiyun vd., 2025). Bu yaklaşım, özellikle yüksek değerli ürünlerin yetiştirildiği alanlarda maliyet-etkin ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Rüzgâr Makineleri ve Helikopterler

Bu yöntem, “sıcaklık inversiyonu” olarak bilinen hava koşulunda etkilidir. Soğuk ve açık gecelerde yeryüzüne yakın hava tabakası hızla soğurken, 10–20 metre yüksekteki tabaka daha sıcak kalır. Rüzgâr makineleri ve helikopterler, güçlü pervaneleri sayesinde üstteki sıcak havayı aşağıya çekerek bitki seviyesindeki soğuk hava ile karıştırır ve sıcaklığın kritik eşiğin üzerinde tutulmasını sağlar. Konvansiyonel rüzgâr makineleri genellikle 4–5 hektarlık alanı koruyabilir ve etkinlikleri büyük ölçüde termal inversiyonun gücüne bağlıdır. Fanların yerleştirilme açısı da kritik önemdedir: 6°–9°'lik açı geniş alanlarda etkili koruma sağlarken, makineye çok yakın bölgelerde koruma zayıf kalabilir; buna karşılık açı büyüdükçe yakındaki bitkiler korunur, etki alanı daralır. Bu nedenle makineler genellikle seri halinde yerleştirilir ve 60°–120°'lik salınım hareketiyle çalıştırılarak hava tabakalarının yeniden katmanlaşması engellenir (Hu vd., 2018).

Helikopterler ise mobil olmaları sayesinde daha geniş alanları kısa sürede koruyabilir. Uygun uçuş yüksekliği (20–30 m) ve hızında (8–40 km/s) gerçekleştirilen çoklu geçişler, bitki seviyesinde 3–6 °C'lik sıcaklık artışı sağlayabilir. Ancak bu etkinin süresi sınırlıdır ve birkaç saat içinde hava eski haline döner, bu yüzden düzenli aralıklarla tekrarlanan uçuşlar gereklidir. Ayrıca helikopterler yüksek operasyon maliyeti (2000–4000 \$/ha·saat) ve gürültü sorunları nedeniyle yalnızca yüksek değerli ürünler için kullanılmaktadır.

Son yıllarda bu teknolojilerde çeşitli yenilikler yapılmıştır. Taşınabilir rüzgâr makineleri, yükseklik ayarı ve 360°'ye kadar salınım yapabilme özellikleriyle küçük ve büyük alanlarda esnek kullanım sağlamaktadır. Ayrıca insansız hava araçları (UAV) ile yapılan çalışmalar, düşük maliyetli uçuş parametreleri kullanılarak bitki örtüsünde 1.5–2 °C sıcaklık artışı elde edilebildiğini göstermektedir. Gelecekte, fan geometrilerinin optimizasyonu, düşük gürültülü tasarımlar ve sensör tabanlı otomatik kontrol sistemleri sayesinde bu teknolojilerin etkinliğinin ve sürdürülebilirliğinin artması beklenmektedir (Dai vd., 2023).

Yağmurlama (Sprinklers)

Yağmurlama sistemleri, don korumasında en yaygın ve etkili aktif yöntemlerden biridir. Temel prensip, suyun donarken dışarıya gizli erime ısısı (latent heat of fusion) yaymasıdır. Bitkilere sürekli su püskürtüldüğünde, bu suyun donma sürecinde açığa çıkan ısı sayesinde bitki yüzeyi yaklaşık 0 °C civarında tutulur ve hücre içi buz kristali oluşumu önlenir. Bununla birlikte, sistemin etkinliği uygulama şekline, kullanılan nozullara, suyun debisine ve çevresel koşullara bağlıdır (Qingmin vd., 2024).

- **Bitki Üzeri Yağmurlama:** Bitkilerin tüm yüzeyini kaplayarak çiçek, yaprak ve meyve üzerinde ince bir buz tabakası oluşturur. Bu buz tabakası, donan suyun sürekli ısı salınımı sayesinde bitkiyi kritik sıcaklık eşiğinin üzerinde tutar. Ancak aşırı buz yükü dallarda kırılmalara neden olabileceğinden, uygulama debisinin kontrol edilmesi büyük önem taşır. Bu nedenle aralıklı (intermittent) yağmurlama yöntemleri geliştirilmiştir. Belirli aralıklarla açılıp kapanan sistemler sayesinde hem su tüketimi %33–88 oranında azaltılabilmiş hem de benzer koruma sağlanabilmektedir (Olszewski vd.,2017).
- **Bitki Altı Mikro-Yağmurlama:** Suyu yalnızca gövde ve kök bölgesine veya toprağın yüzeyine uygular. Bu yöntem, topraktan yayılan ısıнын artmasını sağlar ve bitkinin üst kısımlarında aşırı buz yüklenmesini önleyerek daha dengeli bir koruma sunar.
- **Isıtılmış Su ile Yağmurlama:** Don olayının çok şiddetli olduğu koşullarda suyun önceden ısıtılarak püskürtülmesi, don koruma etkinliğini artırır. Bu yöntem, özellikle -4 °C'nin altındaki sıcaklıklarda etkili olabilir.

Yüzey Sulaması (Surface Irrigation)

Bu yöntem, toprağın daha fazla ısı depolamasını sağlamak için don olayından önce arazinin yüzeyden sulanmasını içerir. Su baskın sulaması veya karık sulaması gibi yöntemlerle arazi suya doyurulur. Islak toprak, kuru topraktan daha yüksek bir ısı kapasitesine sahip olduğu için gündüzleri daha fazla ısı emer ve geceleri bu ısıyı yavaşça havaya yayarak bitki etrafındaki sıcaklığı yükseltir (Snyder ve Melo-Abreu, 2005).

Kombinasyon Yöntemleri

Şiddetli veya uzun süren don olaylarında tek bir yöntemin yetersiz kalabileceği durumlar için birden fazla yöntemin bir arada kullanılması daha etkili olabilir (Shi vd.,2023).

- **Rüzgâr Makineleri ve Isıtıcılar:** Rüzgâr makineleri sıcak havayı aşağı çekerken, ısıtıcılar bu havaya ek ısı katarak koruma alanını genişletir ve etkinliği artırır.
- **Yağmurlama ve Rüzgâr Makineleri:** Bu kombinasyon, özellikle sıcaklık inversiyonu ile birlikte don riskinin yüksek olduğu durumlarda kullanılır. Rüzgâr makineleri üst katmandaki sıcak havayı çekerken, yağmurlama sistemleri bitkilerin yüzeyini korur.

Siber-Fiziksel Sistemler

Tarımda don koruma yöntemlerinin geleceği, geleneksel pasif ve aktif stratejilerin ötesine geçerek, teknolojinin ve verinin akıllıca entegrasyonu ile şekillenmektedir. Günümüzde donla mücadele, reaktif bir eylem olmaktan çıkmış, proaktif ve otomatik bir karar alma sürecine dönüşmüştür. Bu "akıllı entegrasyon," çevresel riskleri en aza indirirken, operasyonel maliyetleri düşürmeyi ve kaynak verimliliğini artırmayı amaçlar. Bu yeni yaklaşım siber-fiziksel sistemler adını almış ve özellikle iklim değişikliğinin getirdiği düzensiz ve öngörülemez hava olayları karşısında tarımsal üretimin sürdürülebilirliği için büyük katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Siber-fiziksel sistemler (CPS), fiziksel dünya ile bilişimsel süreçlerin sıkı etkileşimini sağlayan sistemlerdir ve özellikle tarımsal don koruma alanında bütünsel, akıllı çözümler sunmak üzere giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sistemlerin, ilk dönemlerde işlevleri veri alma, haberleşme, verileri işleme ve kontrol ile sınırlı iken, günümüzde farklı teknolojilerin uyarlanmasıyla uygulama alanları genişlemiş ve etkinliği artmıştır (Hehenberger vd., 2016). Örneğin IoT-tabanlı sensör ağlarından toplanan verileri ileri modelleme teknikleriyle işleyerek don oluşumlarını öngörür, simülasyon/dijital ikizler (digital twins) yardımıyla sanal ortamda senaryoları canlandırır ve yapay zekâ destekli tahmin modelleri (LSTM, RNN, CNN, vb.) ile analiz eder, gerektiğinde erken müdahale için drone, fan, sprinkler gibi fiziksel aktüatörleri otomatik olarak devreye alır hale gelmiştir (Zhou vd., 2020).

Nesnelerin İnterneti Sensör Ağları

Donu önlemek için geliştirilmiş Siber-Fiziksel Sistemlerin (CPS) temelini, sıcaklık, nem, toprak ısı, rüzgâr hızı ve yönü gibi meteorolojik parametreleri anlık ve yerel olarak ölçen IoT (Nesnelerin İnterneti) cihazlarıyla kurulan sensör ağları oluşturur. Bu ağlar, küçük boyutlu, düşük maliyetli ve kablosuz sensörlerin arazinin farklı noktalarına stratejik olarak yerleştirilmesini mümkün kılar. Böylece, geleneksel sabit istasyonların gözden kaçırabileceği, arazinin topografyasına veya bitki örtüsüne bağlı olarak oluşan yerel sıcaklık farklılıklarını, yani "don ceplerini" yüksek hassasiyetle tespit eder (Gaikwad vd., 2021).

Toplanan bu veriler, sadece anlık bir sıcaklık göstergesi olmaktan öte, sahanın her noktasından alınan gerçek zamanlı bir veri akışı sunar. Bu sayede, tarım alanının her bir metrekaresi için dinamik bir termal harita oluşturulabilir. Çiftçiler, bu yüksek mekânsal çözünürlüklü verileri kullanarak don riskinin en yüksek olduğu spesifik bölgeleri belirleyebilir ve koruma önlemlerini sadece bu alanlara yönlendirebilir. Bu hassas yaklaşım, gereksiz enerji ve kaynak kullanımını azaltarak operasyonel maliyetleri düşürür ve çevre üzerindeki etkiyi en aza indirir (Guillén-Navarro vd., 2020).

Fiziksel ve Matematiksel Modelleme / Dijital İkiz (Digital Twin)

Akıllı don koruma sistemlerinin diğeri bir önemli bileşeni, toplanan verileri işleyen ve geleceği tahmin eden gelişmiş fiziksel ve matematiksel modellerdir. Endüstri 4.0 ile birlikte Dijital İkiz Teknolojisi modern dünyanın en güçlü araçlarından biri olarak ön plana çıkmıştır. Bu teknolojiye sadece veri yorumlanmamakta, aynı zamanda bir sistemin fiziksel dinamikleri sanal bir ortamda yeniden yaratılmaktadır. Bir başka deyişle dijital ikiz, fiziksel ortamın anlık verilerle beslenen, sürekli güncellenen ve yaşayan bir simülasyonudur (Henriksen vd., 2023).

Tarımda ve hava durumu tahmininde kullanılan termal denge denklemleri de esas itibarıyla dijital ikiz teknolojisinin öncü adımlarını oluşturmaktadır. IoT, CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) gibi günümüz teknolojilerinin tarıma uyarlanmasıyla da matematiksel modeller dijital ikize evrilmektedir. Örneğin, termal enerji denge denklemleri kullanılarak, bir tarlanın gündüz depoladığı ve gece yaydığı ısı miktarının hesaplanmasının yanı sıra gelen güneş radyasyonunu, yayılan uzun dalga radyasyonunu, buharlaşma sonucu oluşan ısı kaybını ve konveksiyonla olan ısı transferini dikkate alarak sıcaklık değişimleri de hesaplanılır. Daha da ileri gidilerek, IoT ve gerçek zamanlı sensör verileri ile CFD analizleri bu sürece entegre edilir. CFD modelleri, rüzgârın bitki örtüsü üzerindeki akışını ve soğuk havanın arazinin eğimi boyunca nasıl hareket ettiğini sanal ortamda simüle eder (Hua vd., 2025).

Bu analizler sayesinde, tarladaki "don ceplerinin" tam olarak nerede oluşacağı, soğuk hava drenajının nasıl sağlanabileceği veya rüzgâr makinelerinin en etkili şekilde nereye yerleştirileceği gibi kritik bilgilerin elde edilmesiyle çiftçiler bir don olayı sırasında ne olacağını önceden yüksek hassasiyette bilebilirler. Dijital ikiz, gerçek sensör verileriyle sürekli beslenerek fiziksel arazinin o anki durumunu birebir yansıtır. Bu sayede, çiftçiler çeşitli "eğer-ise" (what-if) senaryolarını risksiz bir şekilde sanal ortamda test edebilirler. Örneğin, yağmurlama sistemini 1°C'de mi yoksa 0°C'de mi devreye almanın daha verimli olacağını, hangi ısıtıcı yerleşim planının en az yakıt tüketimiyle en iyi korumayı sağlayacağını veya yeni bir rüzgâr makinesi yatırımının sahaya ne gibi bir fayda sağlayacağını simülasyonlarla görebilirler (Hua vd., 2023; Atam vd., 2020).

Ancak, bu modellerin etkinliğinin temel şartı, girdilerin kalitesidir. Modelin doğruluğu doğrudan sensör verilerinin kalitesiyle ilişkilidir ve her tarla kendine özgü mikro-iklim ve topografyaya sahip olduğu için, bir tarlada elde edilen model çıktılarının başka bir tarla için genellenmemesi gerekir. Bu nedenle, modellerin gerçek ortam koşullarında sürekli olarak test edilmesi ve doğrulanması kritik önem taşır (Hua vd., 2025).

Yapay Zekâ ile Don Tahmini (LSTM, RNN, CNN, vb.)

Akıllı don koruma sistemlerinde önemli bir bileşen, gelecekte meydana gelebilecek don olaylarının önceden ve yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesidir. Bu amaçla yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenimi (ML) algoritmaları, sistemin tahmin çekirdeğini oluşturmaktadır. Geleneksel yöntemlerde çoğunlukla yalnızca sıcaklık verisi dikkate alınırken, modern ML tabanlı yaklaşımlar nem, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu, atmosfer basıncı, toprak sıcaklığı ve hatta topografik veriler gibi çok sayıda meteorolojik parametreyi aynı anda değerlendirebilmekte ve bu parametreler arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenebilmektedir. Böylece yalnızca donun oluşup oluşmayacağını değil, aynı zamanda don olayının şiddetini, süresini ve mekânsal dağılımını da öngörmek mümkün hale gelmektedir (Pérez Tárraga vd., 2025).

Zamana bağılı verilerin işlenmesinde özellikle Yinelemeli Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks, RNN) ve onların geliştirilmiş versiyonu olan Uzun Kısa Vadeli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) ağları öne çıkmaktadır. Bu algoritmalar, geçmişten gelen çok boyutlu meteorolojik verilerdeki zaman serisi ilişkilerini öğrenerek geleceğe yönelik tahminlerde bulunur. Özellikle LSTM modelleri, klasik RNN’lerde görülen “unutma” problemini çözmeleri sayesinde uzun dönemli hava durumu döngülerini hatırlayabilir ve örneğin gece boyunca gerçekleşen sıcaklık değişimlerinin eğilimini doğru şekilde modelleyebilir. Bu durum, ani sıcaklık düşüşlerinin önceden tespit edilmesinde ve çiftçilerin koruyucu önlemleri zamanında uygulayabilmesinde büyük avantaj sağlar (Zhang vd., 2024).

Bunun yanı sıra, sınıflandırma ve regresyon tabanlı yöntemler de don tahmininde önemli rol oynamaktadır. Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM), meteorolojik değişkenleri kullanarak verileri “don riski var” ve “don riski yok” şeklinde iki kategoriye ayırır. Bu algoritma, çok boyutlu veri uzayında en uygun ayırıcı hiper düzlemi bulduğu için özellikle az sayıda ve iyi etiketlenmiş veri setlerinde yüksek doğruluk sunar. Kernel-trick yöntemi ile çok boyutlu verilerde çalışabilmesi ve “aşırı öğrenme (overfitting)” problemine karşı toleransından dolayı tercih edilen bir algoritmadır (Liakos vd., 2018).

Karar ağaçlarının topluluk halinde kullanılmasıyla elde edilen Rastgele Orman (Random Forest, RF) ve Aşırı Gradyan Artırma (Extreme Gradient Boosting, XGBoost) algoritmaları ise, çok sayıda meteorolojik parametre arasındaki doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkileri yakalama konusunda oldukça başarılıdır. Don koruma tahminlerinde en yüksek doğruluğu sunan makine öğrenimi algoritmalarıdır (Shammi vd., 2022).

Bunun yanı sıra, Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) genellikle görüntü analizi ve nesne tespiti için geliştirilmiş olmalarından dolayı tarımsal uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Don tahmininde her ne kadar diğer makine öğrenimi algoritmalarıyla yarışabilse de eğitim süreleri diğer modellere göre çok uzun sürmektedir (Talsma et al., 2022). CNN’ler, tarla üzerindeki sensör ağlarından (İHA/drone) veya uydu görüntülerinden elde edilen mekânsal görüntü verileri işlemekte iyi olduklarından arazideki soğuk hava ceplerinin olduğu bölgeleri ve sıcaklık dağılımındaki düzensizliklerin tespitinde kullanılabilir (Bhakare vd., 2025; Shami vd., 2023).

Don Sonrası Değerlendirme

Don sonrası hasarın belirlenmesi, yalnızca üretici açısından ekonomik kayıpların hesaplanmasında değil, aynı zamanda CPS sistemleri için geri besleme sağlayarak tahmin modellerinin geliştirilmesinde de kritik rol oynamaktadır. Bu süreçte, arazinin hangi bölgelerinin daha fazla etkilendiğini doğru biçimde saptamak, ileride alınacak önlemlerin etkinliğini artırır. Geleneksel yöntemlerde üreticiler çoğunlukla görsel gözlem ve verim kaybı üzerinden değerlendirme yaparken, günümüzde RGB ve multispektral kameralar ile IoT tabanlı sensör ağları sayesinde bitkilere zarar vermeden ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Özellikle multispektral görüntüleme, klorofil miktarındaki azalma veya yaprak yapısındaki değişimleri erken dönemde tespit ederek don hasarının şiddetini sayısallaştırabilmektedir. Bu yöntemler, yapay zekâ algoritmalarıyla entegre edildiğinde don hasarı indeksleri (örneğin marul bitkileri için geliştirilen Frost Damage Index) oluşturularak hem mekânsal hem de zamansal ölçekte ayrıntılı değerlendirme imkânı sunar. Böylece don sonrası analizler yalnızca geriye dönük

maliyet hesaplarında değil, aynı zamanda gelecekteki tahmin modellerinin kalibrasyonunda da önemli bir bilgi kaynağı haline gelmektedir (Liu vd., 2024).

Zorluklar ve Gelecek Araştırmalar

Don tahminine yönelik CPS sistemlerinde entegrasyon eksiklikleri önemli bir sorundur. Mevcut sistemler genellikle yalnızca belirli katmanları (ör. matematiksel model ya da aktüatör kontrolü) kapsamakta, ancak tam entegre bir dijital ikiz yaklaşımı sınırlı kalmaktadır. Ayrıca, don olaylarının kısa süreli ve lokal karakteri nedeniyle veri setleri yetersiz ve meteoroloji verileri mikro-iklimi doğru yansıtmamaktadır. Mikro-iklim koşullarını doğru yansıtacak yüksek çözünürlüklü verilerin toplanması, işlenmesi ve etiketlenmesi zaman alıcı ve iş gücü yoğun bir süreçtir. Başka bir engelde ölçeklenebilirliktir. Yüksek ilk yatırım maliyeti, küçük ölçekli çiftliklerde uygulamaları sınırlandırmaktadır. Dizayn edilen CPS sistemleri az sayıda sensör/aktüatör kullanmakta ve düşük hata toleransına yol açmaktadır. Literatürlerde belirtilen kısıtlar arasında ayrıca tahmin modellerinin çoğunun gerçek zamanlı senaryolarda test edilmemesi, aktif koruma yöntemlerinin adveksiyon donlarına karşı zayıf kalması yer almaktadır (Zhou vd., 2020).

Sonuç

Don koruma sistemleri alanında geliştirilen modern siber-fiziksel sistemler (CPS), sensör tabanlı veri toplama, dijital ikiz ve fiziksel/matematiksel modelleme, yapay zekâ destekli tahmin ve otonom müdahale aşamalarını kapsayan bütünleşik yapılar sunmaktadır. Özellikle yapay zekâ algoritmaları, geleneksel meteorolojik yöntemlerin ötesine geçerek çok boyutlu, uyarlanabilir ve yüksek doğruluklu don tahminleri sağlamaktadır. IoT sensör ağlarından ve uydu tabanlı gözlemlerden elde edilen gerçek zamanlı veriler, LSTM, CNN, RF modelleri gibi gelişmiş yaklaşımlarla işlenerek don olaylarının hem zamansal hem de mekânsal olarak öngörülmesine imkân vermektedir. Bu öngörüler, CPS yapıları içinde İHA'lar, sprinkler, fan veya ısıtıcılar aracılığıyla otomatik ve hedeflenmiş müdahalelere dönüştürülmektedir. Böylece, tarımsal üretimde hem ürün kayıpları en aza indirilebilmekte hem de çiftçilerin ekonomik sürdürülebilirliği ile gıda güvenliği doğrudan desteklenmektedir. Bu kapsamda yapay zekânın mevsimsel değişimlere uyum sağlama, yerel varyasyonları yakalama ve model belirsizliklerini azaltma gibi üstünlükleri ile CPS tabanlı don koruma sistemlerinin ileride daha yaygın hale geleceği öngörülmektedir.

Kaynakça

- Atam, E., Hong, S.-W., and Arteconi, A. (2020). Thermofluid Modelling of Large-Scale Orchards for Optimal Design and Control of Active Frost Prevention Systems. *Energies*, 13(2), 378. <https://doi.org/10.3390/en13020378>
- Bhakare, S., Matiu, M., Crespi, A., and Zardi, D. (2025). Spatial Downscaling of Daily Temperature Minima Using Machine Learning Methods and Application to Frost Forecasting in Two Alpine Valleys. *Atmosphere*, 16(1), 38. <https://doi.org/10.3390/atmos16010038>.
- COP27. (2022). The Sharm El-Sheikh Climate Implementation Summit. <https://cop27.eg/#/>, Erişim Tarihi: 20.08.2025.

- Dai, Y., Boekee, J., Schilperoort, B., Ten Veldhuis, M. C. and Van de Wiel, Bas. (2023). Wind Machines for Frost Damage Mitigation: A Quantitative 3d Investigation Based on Observations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 338. 10.1016/j.agrformet.2023.109522.
- Gaikwad, S. V., Vibhute, A., Kale K. and Mehrotra, S. C. (2021). An innovative IoT based system for precision farming, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 187, 2021, 106291, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106291>.
- Guillén-Navarro, M. A., Martínez-España, R., Bueno-Crespo, A., Morales-García, J., Ayuso, B., and Cecilia, J. M. (2020). A Decision Support System for Water Optimization in Anti-Frost Techniques by Sprinklers. *Sensors*, 20(24), 7129. <https://doi.org/10.3390/s20247129>
- Hehenberger, P., Vogel-Heuser, B., Bradley, D., Eynard, B., Tomiyama, T. and Achiche, S. (2016). “Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications,” *Comput. Ind.*, vol. 82, pp. 273–289, Oct. 2016.
- Henriksen, H. J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Trolborg, L., Seidenfaden, I. K., Kragh, S. J., Bøgh, E., & Stisen, S. (2023). A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital Twin). *Water*, 15(1), 25. <https://doi.org/10.3390/w15010025>
- Hu, Yongguang & Asante, Eric & Lu, Yongzong & Mahmood, Ashraf & Buttar, Noman & Yuan, Shouqi. (2018). Review of air disturbance technology for plant frost protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 11. 21-28. 10.25165/j.ijabe.20181103.3172.
- Hua, W., Heinemann, P.H., He, L., Yuan, W. (2023). CFD Simulation of porous canopy heat transfer in apple orchard-based frost protection. *J. ASABE*. 66(4), 825-837. Doi: 636 10.13031/ja.15550.
- Hua, W.; Heinemann, P.; He, L. (2025). Frost management in agriculture with advanced sensing, modeling, and artificial intelligent technologies: A review. *Comput. Electron. Agric.* 2025, 231, 110027.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., and Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Liu, Y., Ban, S., Wei, S., Li, L., Tian M., Hu, D. , Liu, W. and Yuan, T. (2024). Estimating the frost damage index in lettuce using UAV-based RGB and multispectral images. *Frontiers in Plant Science*. 14. 1242948. 10.3389/fpls.2023.1242948.
- Olszewski, Faith & Jeranyama, Peter & Kennedy, Casey & DeMoranville, Carolyn. (2017). Automated cycled sprinkler irrigation for spring frost protection of cranberries. *Agricultural Water Management*. 189. 19-26. 10.1016/j.agwat.2017.04.014.
- Pérez Tárraga, J., Castillo-Cara, M., Arias-Antúnez, E. et al. Frost forecasting through machine learning algorithms. *Earth Sci Inform* **18**, 183 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01710-6>

Qingmin, P., Lu, Y., Hu, H., and Hu, Y. (2024). Review and research prospects on sprinkler irrigation frost protection for horticultural crops. *Scientia Horticulturae*. 326. 112775. 10.1016/j.scienta.2023.112775.

Shammi, S., Soheli, F., Diepeveen, D., Zander, S., Jones, M, G, K., Bekuma, A. and Biddulph, B. (2022). Machine learning-based detection of freezing events using infrared thermography, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 198, 2022, 107013, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107013>.

Shammi, S., Soheli, F., Diepeveen, D., Zander, S., and Jones, M. G. K. (2023). A survey of image-based computational learning techniques for frost detection in plants. *Information Processing in Agriculture*, 10(2), 164–191. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.02.003>

Shi, C., Hu, Y., Lu, Y., Pan, Q., Kuang, J., Zheng, J. (2023). Investigation on Combination of Airflow Disturbance and Sprinkler Irrigation for Horticultural Crop Frost Protection. *Agricultural Science*. 5. p8. 10.30560/as.v5n1p8.

Snyder, R.L.; de Melo-Abreu, J.P. Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics, Volume 1; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2005; Available online: http://home.isa.utl.pt/~jpabreu/Docs/FROST_Volume1.pdf (accessed on 20 July 2025).

Talsma, C., Solander K. C., Mudunuru, M., Crawford, B., and Powell M. (2022). Frost Prediction Using Machine Learning and Deep Neural Network Models for Use on Iot Sensors. *SSRN Electronic Journal*. 10.2139/ssrn.4032447.

Weiyun, H., Long, H., Heinemann, P., Zhu, M. (2025). Precision heating strategy based dynamic heater path planning for frost protection in apple orchards. *Biosystems Engineering*. 250. 117-132. 10.1016/j.biosystemseng.2024.12.002.

Zhang, W., Li, Z., Tian, Y. and Liu, L. (2024). Research on Temperature Prediction Based on RF-LSTM Modeling. 873-876. 10.1109/IAECST64597.2024.11117915.

Zhou, I., Lipman, J., Abolhasan, M., Shariati, N. and Lamb, D. W. (2020). Frost Monitoring Cyber–Physical System: A Survey on Prediction and Active Protection Methods. *IEEE Internet of Things Journal*. 7. 6514 - 6527. 10.1109/JIOT.2020.2972936.

BÖLÜM 3

YAPRAK MİKROYAPISI, ISLANABİLİRLİK VE SURFAKTAN GEÇİŞİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

1.MUHAMMED CEMAL TORAMAN¹

2. MEDENİ KARAKAYA²

Giriş

Tarımsal uygulamalarda etkili bir mücadele için püskürtme sıvısıyla yaprak yüzeyi arasındaki ilişkinin bilinmesi gereklidir. Böylece yaprak yüzey özelliklerinden hangisinin püskürtme sıvısının uygulama yüzeyindeki performansını arttıracaklarını öngörmek mümkün olabilecektir. Bitki yüzeyleri çok zor ıslanabilen ile çok kolay ıslanabilen olarak geniş bir aralıkta sınıflandırılabilir. Püskürtme uygulamalarının başarısı üzerinde epikutikular balmumu, epidermal hücre yapısı, mum kristalleri, mumların miktarı, biçimi, bileşimi (Puente & Baur, 2011; Massinon & Lebeau, 2012; Wohlfahrt & ark., 2006) yaprak yüzeyindeki kimyasal fonksiyonel gruplar, yaprak pürüzlülüğü, yaprak tüyleri, epidermal hücrelerin genel şekli, kutikula kıvrımları, tüy (trikom) varlığı (Wagner & ark., 2003), mum kristallerinin nano yapısı (Khayet & Ferná'ndez 2012), kılcal damar hareketinin neden olduğu açık trikom paternine sahip bazı bitki türlerinde artan ıslanma (Holloway, 1970), moleküllerin kafes dizilimleri ve yapısı gibi birçok faktörün etkili olduğu sonucu bulunmuştur (Wang & ark., 2014; Brewer & ark., 1991). Yüzey aktif maddeler yaprak yüzeylerinde sahip oldukları özellikler sayesinde

¹ Doç. Dr., Hakkari Üniversitesi, Bitki Koruma Programı, Orcid: 0000-0003-0726-7915

² Öğr. Gör., Hakkari Üniversitesi, Bitki Koruma Programı, Orcid: 0000-0002-6524-0553

yayılma, yapışma ve ıslatma özelliklerini iyileştirerek pülverizasyonun yaprak içine geçişini kolaylaştırırlar (Yarin, 2006).

Bir pülverizasyonun başarısında püskürtme sıvısının fiziksel karakteristiklerinin yansıra yaprak yüzey özellikleri de etkilidir. Yüzey uygulamalarında sıvı-hava yaprak ara yüzeylerinin etkisi püskürtülen sıvının yaprak penetrasyonunda etkili unsurlardandır. Yaprak yüzeyleri bariyer yapısında olsa da üzerindeki mikro yapılar geçirgenliği sağlamaktadır. Bu özelliklerinden faydalanılarak pestisit ve gübreleme uygulamalarında hızlı ve ekonomik sonuçlar elde edilmektedir. Ancak uygulama başarısı yaprak yüzeyinin mikro yapısı ile uygulama çözeltisi arasındaki uyuma bağlıdır.

Genel olarak bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar yaprak alımını çoğunlukla çözelti kimyasına ve uygulama koşullarına indirger. Oysa yaprak yüzeyi, epikutikular mumsu tabaka kristalleri, papillalı epidermis, trikomlar ve stoma çevresindeki mikro kabartılardan oluşan bir topografyaya sahiptir. Bu mikro/nano yapı, damlaların yüzeyde nasıl davrandığını (yuvarlanma, tutunma ya da takılma) belirler ve ıslanma rejimini Cassie–Baxter ile Wenzel durumları arasında yönlendirir (Latthe & ark., 2014; Wang & ark., 2014). Dolayısıyla aynı formülasyon, farklı türlerde birbirinden oldukça farklı sonuçlar doğurabilir.

Yaprak yüzeyinden madde alımı iki yolla gerçekleşir. Birincisi kutikula içinden difüzyon ve stomalar aracılığıyla geçiş. İkincisi ise kutikula, yağ benzeri yapısı nedeniyle apolar ve noniyonik maddeleri kolay geçirir. Buna karşılık, hidrofilik maddelerin geçişi daha zordur ve genellikle yüksek bağıl neme bağlı olarak artar (Fernández & Eichert, 2009). Yaprığın üst (stomasız) ve alt (stomalı) yüzeylerinde yapılan ölçümlerde, hidrofilik maddelerin geçtiği gözeneklerin yarıçapının yalnızca birkaç nanometre kadar küçük olabileceğini göstermiştir (Eichert & Goldbach, 2008). Bu bulgular, yaprak yüzeyinde kimyasal taşınımın aslında bir dizi paralel mikroyol üzerinden yürüdüğünü düşündürür.

Bu fiziksel çerçevede surfaktanlar (yüzey aktif maddeler), damla ile yaprak yüzeyi arasındaki etkileşimi düzenleyerek uygulamanın başarısını etkiler. Noniyonik yüzey aktif maddeler (Tween-20/80; Triton X-100 gibi) ve organosilikonlar (Silwet L-77) gibi yüzey gerilimini hızlıca düşürür, damlanın zor ıslanır yüzeylerde dahi yayılmasını sağlar. Bununla birlikte, yüzey gerilimini fazla düşürerek yüksek yayılma ve ıslanma sağlayan organosilikonların yaprak yüzeyleri tarafından alımı yüksek olmayabilir. Uygulama sıvısının pH'ı, hedef yüzey yapısı ve çevre şartları gibi etkiler bu tür sonuçları belirgin biçimde etkiler (Knoche, 1994). Glifosat ile yapılan uygulama denemelerinde kullanılan organosilikon yüzey aktif maddesinin püskürtme etkinliğini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. (Gaskin Murray & Ray, 1996; Zhang & ark., 2022).

Püskürtme uygulamalarının yaprak yapısı ile olan ilişkilerinin gerek nitelik gerekse nicelik değerlendirilmelerinde FTIR spektroskopisi, floresan izleme ve yüksek çözünürlüklü görüntüleme teknikleri sayesinde daha ayrıntılı sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır. Ayrıca metodolojiye sağladığı katkı sayesinde de hangi yaprak yüzeyi için ne türde bir surfaktanın kullanılması gerektiği ile ilgili daha net yanıtlara ulaşmak ve yaprak alımı dinamiğini anlamak kolaylaşmaktadır.

Pülverizasyonun verimini etkileyen faktörlerin başında gelen yaprak alımı mekanizmasının anlaşılması ile ilgili hala yeteri kadar açıklama bulunmamaktadır. Dinamik yüzey geriliminin yaprak yüzeyindeki mumsu tabaka ile girdiği ilişkinin sayısal analizlerinin eksik kalması, yapraklardaki trikom varlığının uygulama sıvısını yüzeyde tutması ve dağılmasını etkilemesi ile ilgili yaklaşımlardaki eksiklikler, hidrofilik yüzey ajanlarının penetrasyonunun beklenin aksine daha zor olması ve bağıl nemin bu maddelerin geçişini kolaylaştıran su yollarını oluşturduğu mekanizmanın işlevi ile ilgili belirsizlikler örnek olarak verilebilir. (Fernández & Eichert, 2009;

Fernández, 2021). Bu ilişkilerin açıklanmasına yönelik yeni çalışmaların arttırılması konunun anlaşılması için önemli görülmektedir.

Bu çalışma bitki koruma ürünlerinin etkili sonuçlar vermesi için tasarlanan yüzey aktif maddelerinin hedef yaprak yüzeyinde istenilen sonuçlara ulaşmasını sağlamak için gerekli olan penetrasyonun etkinliğini incelemeyi amaçlamaktır. Bunun için öncelikle yaprak yüzey özellikleri olan mumsu tabaka, trikom yoğunluğu, pürüzlülük gibi yüzey yapısının püskürtülen damlaların tutunma, yayılma ve ıslatma performansını değiştirmede etkili olan unsurlarını açıklamaya çalışmaktadır. Ulaşılan sonuçlar dinamik süreçteki davranış değişikliklerini etkileyen önemli faktörlerdir

İkinci olarak, tarımda tercih edilen surfaktan çeşitlerinin (anyonik, katyonik, noniyonik ve biyosurfaktanlar) fonksiyonel zamanda yaprak yüzeyinde kalması, yaprak içine geçmesi, geçen madde miktarının belirlenmesi üzerine ekili olan kutikula ve stoma yapılarıyla ilişkisini anlamaya çalışmayı hedefler.

Üçüncü olarak, tarla uygulamalarında verim üzerine etkili olan çevre şartlarının (sıcaklık, bağıl nem, pH ve püskürtme tekniği) yaprak yüzey enerjisi ve kutikula su varlığını etkilemesi ve yayıcı ve yapıştırıcıların etkinliğini olumlu ya da olumsuz etkileyebilme seviyeleri incelenecektir.

Bu gibi belirsizlikler birlikte değerlendirildiğinde, yaprak mikroyapısı ile yüzey aktif ajanların davranışı arasındaki ilişki daha iyi anlaşılabilir. Elde edilen sonuçlar tarımsal uygulamalarda hem verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirliği artırmak açısından büyük önem taşımaktadır (Latthe & ark., 2014; Fernández, 2021; Eichert & Goldbach, 2008).

Yaprak Yüzeyinin Mikroyapı Özellikleri

Yaprak yüzeyi, bitki ile dış çevre arasındaki en karmaşık ve dinamik sınır tabakalardan biridir. Yaprak yüzeyi su kaybını sınırlayan ancak gaz alışverişine izin veren özellikleri sayesinde ve aynı zamanda bir pülverizasyonda uygulanan çözeltilerin bitki dokusuna geçişini sağlayan belirleyici bir yapıya sahiptir (Mizutani & Shimada, 2020). Yaprak yüzey yapısı sadece sahip olduğu kimyasal bileşimle açıklanamaz, mikro ve nano ölçekteki fiziksel şekillenmeyle de tanımlanması gerekir. Bu çok katmanlı yapı, mikroyapı veya mikrotopografya olarak adlandırılır.

Yaprak yüzeylerinin büyük kısmı, epikutikular mumsu tabaka kristalleri ile kaplıdır. Bu kristaller, bitkinin türüne ve çevre koşullarına bağlı olarak farklı biçimlerde olabilir. Bazı türlerde kristaller ince çubuklar veya tübüler yapılar halinde gelişirken, bazılarında tabaka benzeri bir düzen halinde kendini gösterir (Barthlott & Neinhuis, 1997). Bu yapılar, yüzeyin hidrofobik karakteri üzerinde etkili olup su damlalarının yüzeyde tutunmasını zorlaştırır. Özellikle lotus yapraklarında gözlenen lotus etkisi, mikron ölçekli çıkıntılar ve nano ölçekteki mumsu tabakasının birleşiminden kaynaklanır. Bu düzen, damlanın yüzeye temasını en aza indirerek kendi kendini temizleme özelliği sağlar (Latthe & ark., 2014; Wang & ark., 2009).

Yaprak yüzeyinin ıslanabilirliği, çoğu zaman iki temel modelle açıklanır. Cassie–Baxter ve Wenzel modelleri. Cassie–Baxter durumunda, damla yüzeyin yalnızca tepe noktalarına temas eder ve altındaki mikro boşluklarda hava kalır, bu nedenle yüzey süperhidrofobik davranır. Wenzel durumunda ise damla yüzeyin tüm pürüzlülüğünü doldurarak daha kararlı bir ıslanma oluşturur (Boreyko & Chen, 2009). Bitki türleri genellikle bu iki uç durum arasında değişken bir davranış sergiler. Pürüzlülüğün artması her zaman daha yüksek hidrofobiklik anlamına gelmez. Bazı durumlarda yüzeyin mikro yapısı, damlanın yayılma biçimini yönlendirir.

Mikroyapının bir diğ er önemli bileşeni trikomlardır. Trikomlar, epidermis hücrelerinden dışarı doğru uzanan küçük t  y benzeri yapılardır. Bazı bitkilerde salgı yapan (glandüler), bazılarında ise yalnızca fiziksel koruma sağlayan (non-glandüler) trikomlar bulunur (Werker, 2000). Bu yapılar, yüzeyin mikro pürüzlülüğünü artırarak damlaların hareketini etkiler. Glandüler trikomlar sıvı salgılayabildiği için yüzeyin lokal ıslanabilirliğini artırabilir. Buna karşılıklı yoğun, kıvrımlı trikomlar damlaların yüzeyde yayılmasını engelleyebilir. Dolayısıyla, trikomların madde tutma ve yönlendirme işlevi bitki türüne göre farklılık gösterir.

Mumsu tabaka ve trikom yapılarının yanı sıra stomalar da mikroyapının bir parçasıdır. Stomalar, gaz alı veri inin gerçekleştiği mikroskobik açıklıklardır. Genellikle yaprağın alt yüzeyinde (abaksiyal) yoğunla ırlar, ancak bazı türlerde üst yüzeyde de bulunabilirler. Stomaların  evresi genellikle mumsu tabaka veya papillalı hücrelerle çevrilidir. Bu mikro yapı, damlanın doğrudan stomal açıklığa ulaşmasını engelleyebilir veya yönlendirebilir (Eichert & Goldbach, 2008). Özellikle su bazlı çözeltelerde bu bölgedeki pürüzlülük, sıvının giriş hızını belirleyen önemli bir faktördür.

Yaprak yüzey enerėisi, trikomlar ve epikutikular mum kristalleri ıslanma davranışını belirler. Diğer ifadeyle mikroyapı özelliklerin toplam etkisi, yaprak yüzeyinin enerėi profilini belirleyen unsurlardır (Brewer, Smith, & Vogelmann, 1991; Holloway, 1970). Yüzey enerėisi düşük olan yapraklar ( rneğin *Nerium oleander*, *Brassica oleracea*) genellikle yüksek temas açısına sahiptir ve suyu iter. Buna karşılıklı, enerėi seviyesi yüksek yüzeyler ( rneğin *Zea mays*, *Phaseolus vulgaris*) su damlalarını daha kolay yayar. Püskürtme sıvılarının sahip olduğu fiziksel özellikler damla dağılımını belirleyen parametreler iken, yaprak yüzey özelliklerini temsil eden yüzey enerėisi hedef bölgenin damla özelliklerini belirleyen faktördür. Y zeeye hidrofobik karakter

kazandıran yaprak fiziksel ve kimyasal bütünü damla tutunma, yayılma ve ıslatma performansını etkileyen ana aktörler olurken, ıslanmayı arttıran hidrofilik yüzeyler ise pülverizasyon damlalarının yaprak yüzeyine yayılmasını iyileştiren yüzey enerjilerine sahip karakterler olarak karşımıza çıkar (Fernández & Eichert, 2009; Toraman, 2019).

Yaprak yüzeyinin mikro yapısı, sahip olduğu özellikleri sayesinde uygulamada kullanılan taşıyıcı sıvının etkili maddesinin (ilaç, gübre ve bitki gelişim düzenleyici) yüzeye geçiş hızını, giriş yollarını da belirler. Bu mikro çıkıntılar veya mumsu tabaka kristalleri, sıvının yönlenmesini değiştirerek bazı bölgelerde birikme, bazı bölgelerde ise hızlı akış oluşturabilir. Bu nedenle, surfaktan formülasyonlarının geliştirilmesinde yaprak yüzeyinin fiziksel özelliklerinin dikkate alınması büyük önem taşır.

Surfaktan Türleri ve Etki Mekanizmaları

Surfaktanlar, bitki yapraklarına uygulanan çözeltilerde damlanın davranışını belirleyen en önemli bileşenlerden biridir. Bu maddeler, suyun yüzey gerilimini azaltarak sıvının yaprak yüzeyine daha iyi yayılmasını sağlar. Böylece etkin maddenin yüzeye tutunması, emilimi ve taşınımı kolaylaşır (Knoche, 1994). Surfaktanlar, çözeltide iyonlaşma biçimlerine göre anyonik, katyonik, noniyonik ve amfoterik olmak üzere dört ana sınıfta incelenir.

Anyonik surfaktanlar, suda çözündüklerinde negatif yük taşırlar. Tarımsal formülasyonlarda genellikle sodyum dodesil sülfat (SDS) gibi bileşikler kullanılır. Bu surfaktanlar, suyun yüzey gerilimini etkili biçimde düşürür, ancak yaprağın yağ benzeri kutikula tabakasıyla uyumları sınırlıdır. Bu nedenle bazı bitki türlerinde yaprak içi geçişleri zayıf olabilir. Ayrıca yüksek derişimlerde hücre zarında bozulma riski yaratabilir ve fitotoksik etki görülebilir (Damato & Fishel, 2018).

Katyonik surfaktanlar pozitif yüklüdür ve negatif yüklü yüzeylerle güçlü elektrostatik bağlar kurabilir. Bu özellik, yaprak yüzeyine sıkı adsorpsiyon sağlar, fakat aşırı bağlanma, etkin maddenin hareketini sınırlayabilir. Bu nedenle katyonik surfaktanlar genellikle tek başına değil, diğer yüzey aktif maddelerle birlikte kullanılır (Liu & Zhao, 2023). Ayrıca pH değişimleri veya iyonik dengesizlikler bazı formülasyonların kararlılığını azaltabilir.

Noniyonik surfaktanlar elektriksel yük taşımaz, bu özellikleri nedeniyle yaprak yüzeyindeki iyonik bariyerlerle etkileşimleri düşüktür. Tarımsal uygulamalarda en sık tercih edilen grup budur. Tween-20, Tween-80 ve Triton X-100 gibi etoksilat türevleri, bu surfaktanlara örnektir. Molekül yapılarında hem hidrofilik hem de lipofilik kısımlar bulunduğu için, damlanın yüzeyde daha geniş bir alana yayılmasını sağlarlar. Ayrıca kutikula lipidleriyle kısa süreli etkileşimler kurarak hidrofilik maddelerin geçişini kolaylaştırabilirler (Fernández & Eichert, 2009).

Amfoterik surfaktanlar ortamın pH değerine bağlı olarak pozitif ya da negatif yük kazanabilir. Bu nedenle geniş bir pH aralığında kararlılık gösterirler. Tarımsal formülasyonlarda kullanımları sınırlıdır, ancak iyonik ve noniyonik özellikleri birleştirdikleri için çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesinde giderek daha fazla araştırılmaktadır (Zhang & ark., 2022).

Doğada organik olarak mantarlar, bakteriler, mayalar tarafından üretilen biyosurfaktanlara olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Biyobozunurlukları ve toksisite seviyeleri düşük olan biyosurfaktanlar uygulama sıvısının yüzey gerilimini düşürerek hedef yüzeyde yayılma ve ıslanma kapasitesini artırırlar. Biyosurfaktanlar içerisinde yaygın olarak kullanılanlara rhamnolipid, sophorolipid ve saponin örnek gösterilebilir (Vittal & ark., 2023).

Bitki koruma uygulamalarında yaprak yüzey özellikleri ile çevre şartlarının birlikte değerlendirilmesi başarılı sonuçlara ulaşmak için göz önünde bulundurulması gereken önemli bir metodolojik yaklaşımdır. Püskürtme sıvısının fizikokimyasal özelliklerinin yaprak yüzeyi ile olan etkileşimi ilaç uygulamalarındaki etkinliği belirler. İnce pülverizasyonda hedef yüzeyde küçük çaplı damlarla kaplama sağlanır, havanın kuru olması durumunda hızlı bir buharlaşma ile dağılımda düzensizlik oluşur, film tabakası ince ve kalıcılığı da zayıflar. Diğer taraftan bağıl nemin yüksek olması halinde kutikula geçirgen hale gelerek uygulama sıvısının penetrasyonu artar (Gaskin & ark., 1996). Etkili bir mücadele gerçekleştirmek için yaprak yüzeyi, püskürtme sıvısı, uygulama mekanizasyonu özellikleri ile sıcaklık, nem gibi çevre koşullarının entegre değerlerinin sonuçları belirlediği yaklaşımlar dikkate alınmalıdır (Li & ve ark., 2020).

Bitki koruma uygulamaları üzerinde etkili olan unsurları değerlendirirken faktörleri kimyasal ve fiziksel etkiler olarak gruplayabiliriz. Uygulama sıvısının fiziksel etkileri damla çapı, hedef yüzeye tutunma, yayılma, ıslatma şeklini belirlerken, kimyasal özellikleri kutikula lipidleriyle moleküler düzeyde kurulan etkileşimleri belirler. Yaprak yüzeyinde düzgün bir dağılımın sağlanması hedef yüzey özelliklerinin göz önünde tutularak seçilen uygun surfaktan varlığında mümkündür.

Penetrasyon Kinetiği ve Çevresel Faktörler

Yaprak yüzeyine uygulanan çözeltilerin yüzeyden içeri geçişi üç ardışık basamakta ele alınır. 1-İslenme, 2-Yayılma/film oluşumu, 3-Difüzyon ve doku içi taşınım. Bu basamaklar birbirini tetikler. Herhangi birindeki aksama, toplam alımı sınırlar. Her basamak, surfaktan türü kadar mikroyapı (mumsu tabaka kristalleri, trikomlar, stoma çevresi) ve çevresel koşullara (bağıl nem, sıcaklık, rüzgâr, ışık) duyarlıdır (Fernández & Eichert, 2009; Fernández, 2021).

Bunun yanında zaman, uygulama parametreleri, tuzak yapılar ve pratik sonuçlar da etkili olabilir.

1) Islanma: Damla yüzeye değdiğinde temas açısı $\theta(t)$ ve ara yüzey gerilimi $\gamma(t)$ saniyeler ölçeğinde değişir. Dinamik yüzey gerilimi damlanın ilk yayılma hızını belirleyen ana parametredir. Noniyonik ve organosilikon surfaktanlar, ara yüze hızlı göç ederek $\gamma(t)$ 'yi hızla düşürür. Damlanın geri çekilme eğilimini azaltır ve kararlı bir temas alanı oluşturur. Bu evrede ölçülebilir göstergeler, başlangıç temas açısı (θ_0), ilk saniyelerdeki değişim hızı ($d\theta/dt$) ve yayılma katsayısıdır $S \approx \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG})$. $S > 0$ ise damla kendiliğinden yayılma eğilimindedir (Knoche, 1994). Hidrofobik yapıklarda yüksek θ_0 , bu hızlı düşüşte önemli bir yere sahiptir.

2) Yayılma ve film oluşumu: Islanmadan sonra damla kenar hattı, yüzey pürüzlülüğü ve enerji heterojenlikleriyle etkileşir. Cassie–Baxter koşullarında hava cepleri kalır ve yayılma sınırlanır. Wenzel rejiminde pürüzlülük dolarak daha düşük temasta kararlı bir film oluşur (Boreyko & Chen, 2009). Mikroyapı, film kalınlığını $h(x,y,t)$, sürekliliğini ve buharlaşma profilini belirler. Trikom yoğunluğu, akış çizgilerini yönlendirerek bazı bölgelerde birikim, bazılarında ince film oluşturabilir. Bu da ileride difüzyon hızında alanlar arası farklara yol açar. Bu aşamada Marangoni akımları (yüzey gerilimi farklarından kaynaklanan ve sıvı içinde yüksek gerilimli bölgeden düşük gerilimli bölgeye doğru gelişen akış; yüzey gerilimi gradyanı) nedeniyle surfaktan dağılımını yeniden düzenleyebilir. Dengesiz dağılım film kopmalarına yol açar. Uygun surfaktan türü ve derişimi, $h(t)$ 'yi yeterli süre koruyan, kopuksuz bir film sağlar (Mizutani & Shimada, 2020; Knoche, 1994).

3) Kutikula içinden difüzyon ve doku içi taşınım: Kutikula, yapısı gereği yağda çözünen maddelerin geçişine daha açık, su bazlı maddelere ise daha dirençlidir. Bu yüzden apolar/noniyonik bileşikler için bölünme katsayısı (K_{cw} : kutikula–su) yüksektir ve etkin difüzyon (D_{eff}) daha elverişlidir. Bu yüzden, apolar ya da

noniyonik bileşikler kutikulada daha iyi çözünür ve bu tabakadan daha kolay geçer. Hidrofilik çözünenlerde geçiş, kutikula içindeki su kümeleri varlığına bağımlı hale gelir. Bağlı nem (RH) yükseldiğinde kutikula su içerir, geçici hidrofilik yollar açılır. RH düştüğünde bu yollar kapanır ve D_{eff} azalır (Fernández & Eichert, 2009; Fernández, 2021). Dokuya geçişte, yaprağın üst–alt yüzey asimetrisi devreye girer. Alt yüzey (abaksiyal) çoğu türde stomaca zengindir. Stomanın açık/kapalı durumu ve çevresindeki mikro kabartılar, lokal alımı etkiler. Hidrofilik türlerde nanometre ölçeğindeki su yolu eşdeğer boyutlarına dair deneysel tahminler, geçişin birkaç nm bandında gerçekleşebildiğini göstermiştir (Eichert & Goldbach, 2008).

Zaman ölçeği: Islanma ve yayılma saniyeler–dakikalar içinde tamamlanırken, kutikula içi difüzyon ve doku içi taşınım dakikalar–saatler sürebilir. Bu nedenle yüksek RH geçiş yolları (çoğunlukla sabah/akşam) hidrofilik maddeler için toplam alımı artırır. Sıcaklık artışı genelde viskoziteyi düşürerek difüzyonu hızlandırır. Ancak çok sıcak ve kuru koşullarda hızlı buharlaşma film bütünlüğünü bozabilir (Fernández, 2021).

Uygulama parametreleri: Damla boyutu ve püskürtme basıncı film kalınlığını, buharlaşma hızını ve akış kayıplarını belirler. Küçük damlalar hızla kuruyup film kopukluğu yaratabilir. Aşırı büyük damlalar akarak kayba neden olur. Organosilikonlar, yüzey gerilimini çok hızlı düşürme özellikleri nedeniyle püskürtme parametrelerinden en fazla etkilenen surfaktan sınıfıdır. Organosilikon yoğunluğu, meme tipi ve hız ile birlikte optimize edilmelidir. Sistemik bileşiklerde araziden elde edilen veriler bu eşleşmenin verim üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Ancak noniyonik ve anyonik surfaktanlar da damla boyutu, film kararlılığı ve buharlaşma dinamiklerini etkiler. Bu nedenle tüm surfaktan türleri için uygulama koşulları birlikte değerlendirilmelidir. (Gaskin, Murray & Ray, 1996; Baratella & Trinchera, 2018; Mullin & ark., 2016).

Pratik sonuç: Toplam alım; 1) $\gamma(t)$ ve $\theta(t)$ ile tanımlanan hızlı ıslanma, 2) kopuksuz $h(t)$ film oluşumu ve 3) $K_{cw} \times D_{eff}$ ile temsil edilebilecek difüzyon geçişinin çarpımı gibidir. Hidrofobik, mumsu tabakası yoğun olan yüzeylerde dinamik gerilimi hızla düşüren noniyonik/organosilikonlar ilk iki basamakta avantaj sağlar. Hidrofilik bileşiklerde yüksek RH, üçüncü basamağı açar. Tür-yüzey farklılığı nedeniyle tek formül herkese uymaz. Yüzey mikroyapısı ve iklim şartları birlikte ele alınmalıdır (Fernández & Eichert, 2009; Fernández, 2021).

Başlıca tuzaklar: Aşırı surfaktan, aşırı adsorpsiyon, takılma kaynaklı heterojen dağılıma yol açabilir. pH ve iyonik güçteki uygunsuzluklar bazı aktif maddelerin kararlılığını düşürür. Bu nedenle formülasyon (tip-derişim), uygulama anı (RH-sıcaklık) ve püskürtme ayarları (damla boyutu-basınç) birlikte optimize edilmelidir (Knoche, 1994; Liu & Zhao, 2023).

Islanma ve dinamik yüzey gerilimi

Damla yaprak yüzeyine temas ettiği anda yüzey gerilimi sabit bir değer olarak kalmaz, saniyeler içinde değişir. Bu zamana bağlı davranış, dinamik yüzey gerilimi olarak tanımlanır ve damlanın yayılma hızıyla temas açısını belirleyen temel faktörlerden biridir (Fernández, 2021). Surfaktan molekülleri çözeltiden ara yüze doğru hareket ettikçe yüzey gerilimi azalır. Gerilimin ne kadar hızlı düştüğü, damlanın ne kadar çabuk ve ne ölçüde yayılacağını belirler (Knoche, 1994).

Damlanın yaprak yüzeyine tutunması ile başlayan yayılma zamana bağlı olarak hızlı bir şekilde gerçekleşir ve temas açısı düşer. Bu dinamik temas açısı değeri $\theta(t)$ ile gösterilir. Süreç sonunda damla en son temas açısını oluşturacak şekilde sabit kalır. Bu denge temas açısı θ_c ile belirtilir. Hedef yüzeydeki damlanın tutunması ile birlikte oluşan yüksek temas açısı zamana bağlı olarak giderek küçülmeye başlar. Entegre yaklaşıma göre damla en son halini alarak

yüzeyde sabit kalır. Bu dinamik süreçte damla ileri (θ_A) ve geri (θ_R) temas açılarına sahip olur. Başlangıçta damlanın yüzeyde oluşturduğu yüksek temas açısı bu süreçte sürekli değişerek zamanla küçülür. Dengeye ulaşıldığında ise sabit temas açısı ile kalır. Surfaktanlar (yüzey aktif maddeler) genellikle hem θ_A 'yı hem de θ_R 'yi düşürür, ancak genellikle histerezisi ($\theta_A - \theta_R$ farkını) azaltacak şekilde etki ederler. Bu, damlanın yapışmasını korurken aynı zamanda daha homojen bir şekilde yayılmasına ve yaprak yüzeyiyle daha iyi temas etmesine olanak tanır. Dengeli bir ıslanma ve yapışma için optimum bir histerezis değeri hedeflenir (Mizutani & Shimada, 2020).

Yüzey gerilimi değişimi iki temel süreçle kontrol edilir. Bunlar difüzyon ve adsorpsiyon süreçleridir. İlk olarak, surfaktan molekülleri çözelti içinden ara yüze difüzyonla ulaşır, ardından ara yüzde düzenlenerek adsorbe olurlar. Bu süreçler ne kadar hızlı gerçekleşirse yüzey gerilimi de o kadar kısa sürede düşer. Erken zamanlarda (ms–s) difüzyon sınırlayıcı olabilir. Organosilikon ve bazı noniyonik surfaktanlar, ara yüze çok hızlı ulaşabildikleri için ilk saniyelerde belirgin bir gerilim azalması oluşturur. Ancak çözeltinin derişimi kritik misel konsantrasyonunun çok üstüne çıktığında, yüzey doygunluğu nedeniyle yerel dengesizlikler ve aşırı adsorpsiyon görülebilir (Fernández & Eichert, 2009).

Damlanın yüzeyde tamamen yayılıp yayılmayacağını belirleyen bir diğer nicelik yayılma katsayısıdır (S). Bu katsayı, yüzey gerilimleri arasındaki enerji farkına dayanır ve $S = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG})$ eşitliğiyle ifade edilir. Burada γ_{SG} katı–gaz, γ_{SL} katı–sıvı, γ_{LG} ise sıvı–gaz ara yüzey gerilimlerini gösterir. Eğer $S > 0$ ise sıvı yüzeye tamamen yayılır ve film oluşturur. $S < 0$ olduğunda damla belirli bir temas açısıyla kalır. Surfaktanlar sıvı–gaz gerilimini düşürerek S değerini artırır, böylece yayılmayı kolaylaştırır. Bu etki özellikle mumsu tabaka açısından zengin, hidrofobik yapraklarda önem kazanır (Knoche, 1994).

Bazı durumlarda surfaktanlar yüzeyde eşit dağılmaz ve yüzey gerilimi farklı bölgelerde farklı değerler alır. Bu durumda sıvı, yüksek gerilimli bölgeden düşük gerilimli bölgeye doğru hareket eder. Bu harekete Marangoni akımı denir. Marangoni akımları damlanın iç yapısında akış yaratarak surfaktanların yeniden dağılmasına yol açabilir. Orta düzeyde olduğunda yayılmayı hızlandırır, ancak çok güçlü olduğunda filmde düzensizlik ve kopma oluşturabilir (Knoche, 1994). Saf su damlalarında bu akımlar genellikle buharlaşma kaynaklı sıcaklık farklarından doğar ve zayıftır. Surfaktan varlığında ise kimyasal derişim farkları akımı kuvvetlendirir.

Yaprak yüzeyinin mikroyapısı da ıslanma davranışını belirler. Mumsu tabakası kalın ve düzensiz olan yaprakların yüzey enerjisi düşüktür. Bu nedenle dinamik yüzey gerilimini hızla azaltan surfaktanlar daha etkin olur (Latthe & ark., 2014). Trikom yoğunluğu fazla olan türlerde damla kenarı fiziksel olarak takılabilir ve yayılma sınırlanır. Stoma çevresindeki mikro kabartılar ve enerji farklılıkları ise damlanın yönelmesini etkileyebilir. Bu bölgelerde erken yayılma, ilerleyen aşamalarda lokal temas süresini artırarak penetrasyonu kolaylaştırabilir (Eichert & Goldbach, 2008).

Dinamik yüzey gerilimi laboratuvarında genellikle maksimum kabarcık basıncı tansiyometresi veya osilasyonlu/asılı damla yöntemleriyle ölçülür. Bu teknikler milisaniye–saniye ölçeğinde gerilim değişimlerini belirleyebilir. Ancak laboratuvar koşullarında elde edilen veriler çoğu zaman düzgün cam/plastik yüzeylere aittir. Gerçek yaprak yüzeylerinde mikropürüzlülük ve mumsu tabaka nedeniyle bu değerlerin farklılık gösterebilmesi ve arazi uygulamalarına doğrudan taşınamayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Rosen & Kunjappu, 2012; Fernández, 2021).

Uygulama açısından, dinamik yüzey gerilimi en çok ilk saniyelerde belirleyicidir. Gerilimi hızlı düşüren surfaktanlar, damlanın daha geniş bir alana yayılmasını ve daha kararlı bir film

oluşturmasını sağlar. Bununla birlikte, hızlı yayılma her zaman daha yüksek alım anlamına gelmez. Etkin penetrasyon, sadece ilk yayılmaya değil, aynı zamanda kutikula içi difüzyona, pH ve iyonik koşullara da bağlıdır (Fernández & Eichert, 2009). Aşırı surfaktan derişimi, yüzeyde dengesizlik yaratabilir. Bu nedenle optimum konsantrasyon aralığı tercih edilmelidir. Ayrıca sıcak ve kuru koşullarda damlalar hızla buharlaşır. Yayılma tamamlanmadan film kopabilir. Bağlı nemin yüksek olduğu sabah veya akşam saatleri, ıslanma aşaması için daha uygun bir çevresel yol sunar (Fernández, 2021).

Yayılma ve ince film oluşumu

Damla yaprak yüzeyine temas ettikten sonra, ilk ıslanma evresi kısa sürede yerini yayılma aşamasına bırakır. Bu aşamada sıvı, yüzeydeki pürüzlerin, mumsu tabaka kristallerinin ve mikromorfolojik yapıların etkisi altında genişler. Yayılma, damla kenar hattının (contact line) hareketiyle tanımlanır ve bu süreçte hem yüzey enerjisi farklılıkları hem de yüzey geriliminin zamana bağlı değişimi belirleyici olur (Fernández & Eichert, 2009).

Damla davranışının yüzeysel etkisini açıklamasında iki model üzerinden açıklama yapılmaktadır. Damlanın yüzeye tam temas ederek yayılması durumuna Wenzel rejimi denir. Yani yüzeydeki çukur ve tepelere nüfuz etme halidir. Mumsu kristallerin yoğun olduğu homojen pürüzlü yaprak yüzeylerinde damlalar Wenzel davranışı gösterir, yüzeye daha fazla yayılarak temas açısı azalır ve yüzeyde kararlı hale gelir. Wenzel rejiminde surfaktanlı çözeltilerle yapılan uygulamalarda yayılma ve difüzyon artar. Cassie–Baxter modelinde damla yaprak yüzey pürüzleri arasına tam olarak temas etmez. Yüzeye temas eden kısımlar arasında hava cepleri kalır. Hava cepleri yüzeye doğrudan teması azalttığı için temas açısı artar ve yüzeyin süperhidrofobik karakter kazanmasını sağlar. Bu etki ile su damlası yüzeyde kolayca akabilir. Lotus yaprağı lahana ve kaktüs gibi bitki yüzeyleri Cassie–Baxter rejimine örnek

olarak verilebilir (Boreyko & Chen, 2009). Tabiattaki yaprak yüzeyleri bu iki rejim arasında özellikler gösterir. Bazı bölgelerde damla yüzeye tam temas hâlinindedir (Wenzel rejimi), bazı bölgelerde hava cepleri hapsolür (Cassie–Baxter rejimi).

Bir pülverizasyonda damlalar yaprak yüzeyinde ince bir sıvı film tabakası oluşturacak şekilde yayılır. Yaprığın mikroyapısına bağılı olarak oluşan film tabakası kalınlığı değışiklik gösterir. Bu değışikliğin tanımlanmasında üç değışkene bağılı bir fonksiyon kullanılır. Bu fonksiyonda $h(x,y,t)$ yaprak yüzeyi üzerinde oluşan damla kalınlığının, süreç içerisinde değışimini açıklamaya çalışır. Burada x ve y yüzey konumunu, t zamanı, h ise film kalınlığını temsil eder. Buna göre yaprağın bir noktasında film kalınlığı sabit değildir. Zaman ve yer değıştikçe kalınlık da değışir. Damla yüzeye yayıldığında en fazla merkez bölgede birikerek kalın film oluşumuna neden olur. Sıvı kenarlara yayıldıkça yoğunluk azalır ve ince film oluşur. Buna yerçekimi, yüzey gerilimi ve yaprak mikroyapısı neden olur. Sıvı film zamanla buharlaşarak h 'ın azalmasına neden olur. İlk saniyelerde buharlaşma yavaş olur. Film incelmeye başladıkça buharlaşma hızında da artış gerçekleşir. Yüzey kararsızlıkları (mumsu kristaller, pürüzlülük vb.) belirli yerlerde bölgesel kopukluklar oluşturarak yerel olarak parçalanmalara neden olabilir. Yaprak yüzeyindeki mikropapillalar, mumsu kristaller veya trikomlar, $h(x, y, t)$ fonksiyonunun düzgün bir dağılımda ilerlemesini engeller. Bu nedenle film pürüzlü yüzeyde homojen olmayan bir yapıya dönüşür. Bir maddenin yaprak yüzeyinden difüzyonu için filmin yeterince kalın, kesintisiz ve belirli bir süre boyunca varlığını sürdüren bir tabaka olması gerekir. Film kalınlığının çok ince veya kopuk olması durumunda, kutikula ile temas süresi azalır, difüzyon hızı düşer dolayısıyla etkin maddenin yaprak tarafından alınması gerçekleşmez. Bu nedenle $h(x,y,t)$ 'nin stabil olması, yaprak uygulamaları için önemlidir (Mizutani & Shimada, 2020; Ou & ark., 2023; Wohlfahrt & ark., 2006).

Surfaktanlar yüzeyde oluşturduğu yayılma ve ıslanma sürecini iki şekilde etkilerler. İlk olarak püskürtme sıvısı ile uygulama yüzeyi arasındaki yüzey gerilimlerini değiştirerek gerçekleştirirler. Yani surfaktanlar, sıvı–hava ara yüzey gerilimini azaltarak damlanın yüzeyde daha geniş bir alana yayılmasını sağlarlar. Bu etki, damlanın yaprak yüzeyine yayılmasını ve ıslanmayı artırarak film oluşumunu başlatır (Toraman & Bayat 2015). İkinci olarak Marangoni nedeniyle oluşan gerilim farklarını dengeleyerek etkili olur. Surfaktanlar, film boyunca yüzey gerilimi farklılıklarını azaltarak sıvının yüzeyde daha homojen dağılmasına yardımcı olur. Böylece film sürekliliği korunur ve buharlaşma kaynaklı kopmalar azalır. Surfaktan katkılı damlalar yüzeyde eşit dağılmadığında, yüzey gerilimi gradyanları oluşur ve sıvı yüksek gerilimli bölgelerden düşük gerilimli bölgelere akar, bu durum Marangoni akımları olarak bilinir. Orta düzeyde bu akımlar film oluşumunu desteklerken, aşırı şiddette olduklarında yüzeyde düzensizlik ve kopmalara neden olabilir. (Knoche, 1994).

Yayılmanın ilerlemesiyle birlikte yüzeyde oluşan film, kısa sürede yarı kararlı bir duruma ulaşır. Bu noktada film kalınlığı sabit değildir, ancak buharlaşma hızı ve kapillar kuvvetler arasında bir denge sağlanır. Bu denge üzerine etkili olan sıcaklık, nem ve hava hareketleri gibi çevre faktörleri belirleyici durumdadırlar. Uygulama sırasında sıcaklık yüksek bağıl nem düşük ise damla buharlaşma hızı artar filmde incelme başlayarak lokal kopmalar meydana gelir. Ortam neminin yüksek olması durumunda film kalınlığında stabil bir yapı oluşarak difüzyon için elverişli çevre koşulu oluşur (Fernández, 2021; Kolyva & ark., 2012; Wang & ark., 2014).

Yaprak yüzeylerinde damla yayılmasını etkileyen sıvı fiziksel özelliklerinden biri viskozitedir. Formülasyon hazırlığında surfaktanların viskozite üzerindeki etkileri sıvının yaprak yüzeyindeki dağılma, yayılma ve ıslatma özelliklerini belirleyen bir etkidir. Düşük viskoziteye sahip damlalar yüzeyde hızlı yayılarak

iyi bir kaplama sağlarken buharlaşmaya karşı dirençleri sınırlıdır. Yüksek viskoziteli sıvılar ile yapılan uygulamalarda ise sıvı yüzeye düşük hızda yayılarak kaplama düzensizliği sağlayabilir. Ancak daha kalın ve kararlı bir film oluşumu gerçekleşir. Organosilikon esaslı surfaktanlar ile hazırlanan bir püskürtme uygulamasında yüksek yayılma hızına sahip olmasına rağmen kararlı bir film tabakası oluşumunda düşüőe sebep olabilir. Noniyonik bir uygulamada ise daha yavaş ancak kontrollü ve dengeli bir dağılım gözlenir. Uygulamada etkili bir sonuç alınabilmesi için her iki davranışın arasında optimum dengenin sağlanması istenir (Knoche, 1994; Fernández, 2021).

Yaprak yüzeyine uygulanan sıvı formülasyonun oluşturduğu film tabakası yaprağın morfolojik özellikleri ile sıkı bir ilişki içindedir. Bitki türleri farklı epikutikular mum kristalleri, trikom yoğunluğu, hidrofilik, hidrofobik karaktere sahip olduğundan aynı surfaktanla hazırlanmış bir karışım farklı yaprak yüzeylerinde farklı davranışlar gösterir. Yüzeyi yoğun mum kristalleri içeren lahana (*Brassica oleracea*) gibi türlerde sıvı filmi birbirine bağlı olmayan, dağınık, heterojen bir yapıda oluşur. Mum kristalleri yüzeyi süperhidrofobik karakter kazandırarak damlaların yüzeye temasını azaltır dolayısıyla film tabakasının kesintiye uğramasına sebep olarak sıvının küçük alanlara hapsolmasına veya yüzeyde yuvarlanmasına yol açar. Bundan dolayı yüzeyde kuru bölgeler ve sıvı birikimi olan bölgeler oluşur. Buna karşılık fasulye (*Phaseolus vulgaris*) gibi epikutikular mum birikimi daha az olan, dolayısıyla daha hidrofilik yüzeylerde damla temas açısı daha küçük oluşarak yüzeyi daha fazla ıslatır, film tabakası yüzeye tamamen yayılarak homojen sürekli ve kararlı olur. Film yapısı düzgün ve tek parça hâlinde, difüzyon için daha elverişli bir ortam oluşur. Trikom yoğunluğu yüksek olan yapraklarda damla dağılımında iki durum ile karşılaşmaktadır. Adaçayı, domates, bazı Solanaceae türleri gibi türlerde film tabakasının kesintiye uğradığı, uygulama sıvısının trikomların

arasına eşit dağılmadan, bazı bölgelerde havada asılı kalmış gibi yayıldığı görülür. Diğerinde ise Trikom tepelerinde çok ince film oluşurken çukurluklarda daha kalın film birikir. Bu durumda yüzeyde yüksek varyanslı $h(x,y,t)$ bir dağılıma neden olur. Sonuçta film süreksiz ve düzensiz olduğundan difüzyon tüm yüzeyde eşit gerçekleşmez. Etkili bir aktif madde alımı için film tabakasının sürekliliği, kalınlığı, buharlaşma hızı, temas süresi ve kararlılığı önemlidir. Bu nedenle yaprak yüzeyinin morfolojisi, surfaktanların gerçek etkinliğini doğrudan etkileyen fiziksel bir koşul oluşturur (Fernández & Eichert, 2009).

Yayılma aşamasının sonunda oluşan film, difüzyon sürecinin başlangıç koşullarını belirler. Film sürekliliği ve kalınlığı ne kadar kararlıysa, etkin madde yaprak yüzeyinde o kadar uzun süre kalır. Bu nedenle yayılma, yalnızca fiziksel bir genişleme süreci değil, sonraki taşınım aşamalarının temelini oluşturan bir denge evresidir. Bu optimum yayılma, yüzey enerjisi, surfaktan tipi ve çevresel koşulların birlikte değerlendirilmesiyle elde edilir.

Kutikula içinden difüzyon ve doku içi taşınım

Yaprak yüzeyine ulaşan bir çözeltinin bitki dokularına girmesi, öncelikle kutikala tabakasını aşmasıyla mümkündür. Kutikula, bitkinin dış çevreyle ilk temas bariyeridir ve çoğunlukla yağ benzeri (lipofilik) bileşenlerden oluşur. Bu nedenle su bazlı veya iyonik maddelerin geçişi sınırlıdır. Buna karşılık yağda çözünen (apolar) bileşikler kutikula içinde daha kolay hareket eder (Fernández & Eichert, 2009). Kutikulanın geçirgenliği hem kimyasal bileşimine hem de fiziksel yapısına bağlıdır. Mum tabakası yoğunluğu fazla olan türlerde kutikula daha hidrofobik hale gelir. Bu durumda hidrofilik maddelerin geçişi zorlaşır.

Yaprak kutikulası, dıştan uygulanan bir maddenin bitki dokusuna girişindeki en önemli bariyerlerden biridir. Bu tabaka lipit ağırlıklı bir yapıya sahip olduğu için maddelerin kutikula içindeki

hareketi yoğunlukla difüzyon ile gerçekleşir. Difüzyon, moleküllerin yüksek yoğunluktan düşük yoğunluğa doğru hareket etmesidir. Bu süreç Fick yasaları ile matematiksel olarak tanımlanır. Difüzyon hızını belirleyen iki temel parametre vardır. Bölünme katsayısı (K_{cw}) ve etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}). Bölünme katsayısı, maddenin hangi durumda daha çok çözüneceğini gösteren bir gösterge değeridir. Diğer bir ifadeyle maddenin kutikula fazı ile su fazı arasındaki çözünme tercihinin bir ölçüsüdür ve $K_{cw} = (\text{kutikuladaki derişim}) / (\text{sulu fazdaki derişim})$ eşitliği ile gösterilir. Bölünme katsayısı değeri $K_{cw} > 1$ ise madde kutikula (lipit) içinde daha rahat çözünerek giriş kolaylaşır. $K_{cw} < 1$ ise madde su fazını tercih eder kutikuladan geçiş zorlaşır. K_{cw} değeri ne kadar büyük olursa kutikula içerisindeki hareketi o kadar kolay olur. Etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}), maddenin kutikula içindeki hareket hızını gösteren nicel bir ölçüdür. Etkin difüzyon katsayısı kutikulanın yapısına, sıcaklığa, bağıl neme, maddenin moleköl boyutu ve polaritesine bağlıdır. Etkin difüzyon katsayısı yüksek olan bileşikler yüzey tabakasından daha hızlı geçiş yaparlar. Tersî durumunda ise madde kutikulada ilerleyemez, yaprak alımı yavaş olur. Kutikula içindeki net madde akışı (J) bölünme katsayısı (K_{cw}) ile etkin difüzyon katsayısı (D_{eff}) nın çarpımı ile doğru orantılı sonuçlar veren madde geçişini tanımlar. Buradan anlaşıldığına göre madde kutikulada iyi çözünürse ve kutikula içinde hızlı hareket ederse geçiş (J) artar ve difüzyon çok daha hızlı gerçekleşir. Diğer bir ifadeyle Kutikul'a girme isteğı $\times$ Kutikul içinde ilerleme hızı = Toplam geçiş miktarını oluşturur. Yani bir aktif madde kutikula içinde hem çözünmeyi hem de hareket edebilmeyi başarır ise yaprak tarafından hızla alınır (Fernández, 2021).

Kutikula, dışarıdan bakıldığında ince ve tek parça bir zar gibi görünse de, mikroskobik ölçekte oldukça karmaşık ve heterojen bir yapıya sahiptir. Kristalin düzenli sıralanmış mum bölgeleri yoğun ve kompakt mum kristallerinden oluşur. Yapı çok düzenli olduğundan

moleküller için sıkı bir bariyer görevi görür, maddenin içeriye doğru ilerlemesini yavaşlatır ve arasından geçmek zor olduğundan difüzyona dirençlidir. Mum yapısının daha gevşek, daha düzensiz olduğu alanlar amorf (yarı düzenli, düzensiz) bölgeler aktif maddelerin kutikula içinde daha kolay ilerlemesini sağlar. Moleküller arasında daha fazla boşluk bulunduğundan geçici ve düzensiz mikrokanaallar oluşturur. Bu kanallar sayesinde amorf bölgeler difüzyona daha açıktır. Kutikula içinden geçen aktif maddeler tek bir doğrusal yol izlemez, farklı direnç düzeylerine sahip bu iki yapıyı karışık şekilde geçer (Schreiber, 2005). Bu yüzden ki kutikulanın difüzyon dinamiği, çoğu zaman mozaik model olarak tanımlanır. Sürfaktanlar bazen amorf bölgeleri genişleterek geçişi kolaylaştırır bazen de kristal bölgelerdeki mum düzenini geçici olarak gevşetir. Bu nedenle kutikula yapısının homojen olmaması, yüzey kimyası ile taşınım fiziği arasındaki ilişki için önemli bir faktördür (Eichert & Goldbach, 2008).

Hidrofilik özellikteki moleküllerin kutikuladan geçişi, bu tabakanın lipofilik karakteri nedeniyle oldukça kısıtlıdır. Söz konusu moleküllerin geçişi için hidrofilik mikrokanaallar ve stoma açıklıkları alternatif yollar olarak tanımlanmaktadır. Stoma çevresindeki lokal nem artışına bağlı olarak kutikulanın su içeriğinin yükselmesi, hidrofilik moleküllerin geçişine imkân veren geçici penetrasyon pencereleri oluşturmaktadır. (Fernández, 2021). Bununla birlikte, stomalar her zaman açık değildir. Bu nedenle stoma temelli geçişler koşullara bağlı ve sınırlı bir katkı sağlar.

Bağıl nem (RH), sıcaklık ve ışık gibi çevresel etmenler kutikula geçirgenliğini doğrudan etkiler. Yüksek bağıl nemde kutikula suyla doyurulur, su kümeleri arasında hidrofilik maddeler için geçici difüzyon yolları açılır. Düşük bağıl nemde bu yollar kapanır ve lipofilik taşıma baskın hale gelir. Sıcaklık arttığında mumsu tabaka kristalleri yumuşar, molekül hareketliliği artar ve

difüzyon hızlanır. Ancak aşırı sıcaklık buharlaşmayı hızlandırarak genel alımı azaltabilir (Schreiber, 2005).

Kutikula bariyerini aşmayı başaran moleküller, mezofil dokusu gibi canlı yapılara ulaşır. Bu aşamadan sonra taşınım mekanizması, salt fiziksel difüzyonla sınırlı kalmayıp biyokimyasal seçicilik unsurlarıyla da yönetilir. Lipofilik karakterdeki bileşikler kutikula lipitleriyle yüksek uyum gösterdiğinden geçişleri nispeten kolayken, hidrofilik veya iyonik yapıdaki maddelerin doku içine alınabilmeleri için spesifik taşıyıcı sistemler veya çözelti pH'ı gibi ek faktörlerin varlığına gereksinim duyulur. (Fernández, 2021).

Pratik uygulamalar dikkate alındığında, yaprak uygulamalarının karmaşık bir süreç olduğu, dolayısıyla çözeltilerin kutikula içine taşınması sadece surfaktan türüne bağlı olmayıp, uygulama zamanı ve çevresel faktörlerle de uyum içinde olmalıdır (Fernández & Brown, 2013; Wang & Liu, 2007). Nem oranının yüksek olduğu koşullarda hidrofilik bileşenlerin absorpsiyonu artış gösterirken, sıcak ve kurak ortamlarda lipofilik maddeler daha avantajlı hale gelmektedir. Surfaktan seçiminin, hedef alınan bileşiğin kimyasal özellikleri ve kutikula yapısı temel alınarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Khayet & Fernández, 2012). Bu sayede hem yayılma hem de difüzyon süreçleri optimum düzeyde dengelenebilir.

Uygulama parametreleri ve çevresel etkileşimler

Bitki koruma uygulamalarında başarının artması, kullanılan ekipmanların yanı sıra çevre şartlarına bağlıdır. Etkili bir ilaçlama ancak iyi tasarlanmış bir meme ile düzgün bir dağılım gerçekleştirmeyi sağlayan çalışma basıncının yüzeyde homojen bir kaplama oluşturan damla çapı üretmesi ile mümkün olur. Bu teknik parametrelerin yanında ilaçlamayı etkileyen sıcaklık, hava akımı, bağıl nem, gibi çevre faktörleri de pülverizasyon üzerinde belirleyici durumdadır. İlaçlamayı başarısını sağlayan aktif maddenin biyolojik

alımı üzerinde tüm bu özelliklerin yüzey ile olan dinamik etkileşimi doğrudan etkilidir.

İlaçlama uygulamalarında iyi bir kaplama sağlanması için küçük damla çapları ile çalışılması istenir. Bu etkili bir ilaçlama için kabul gören bir yaklaşımdır. Ancak ince çaplı pülverizasyonda damlalar havada daha fazla asılı kalır, buharlaşma eğilimi belirir, hedef dışına sürüklenerek (drift) ilaçlama başarısı düşer ve kayıplar artar (Knoche, 1994). İlaçlamada damla çapı ve uygulama hacminin birleşik etkisi, iş başarısını sağlayan tutunma, yapışma, yayılma ve ıslatma dinamik süreçlerini ve sonunda yüzeyde film tabakası kalınlığının oluşumunu sağlar böylece yaprak alımı ile ilaçlama amacına ulaşır. İri damlacıklar ile yapılan uygulamalarda yüzeylerde kalın film tabakası oluşumu sağlansa da, yüzeyden akma eğilimleri de artar (Wyatt & ark., 2018).

Pülverizasyonun teknik özelliklerinden olan meme tasarımı ve uygulama basıncı püskürtme hacmini belirleyen unsurlardır. Li & arkadaşları (2020) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, farklı meme tiplerinin püskürtme parametreleri (damla çapı, basınç, mesafe) ile oluşan damlaların birleşik etkilerini incelenmiş, bir pülverizasyon için uygun olan dinamik parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Uygulama sıvısının fizikokimyasal özellikleri de uygulama performansı üzerinde belirleyici olmaktadır. Pestisit formülasyonlarına eklenen adjuvantların, yüzey gerilimi, temas açısı, damla boyutu dağılımı ve yapışma özellikleri üzerinde önemli değişikliklere yol açtığı bilinmektedir. Basílio ve çalışma arkadaşları (2024) ile Toraman (2019) tarafından yürütülen araştırmalar, farklı aktif madde tiplerinin yüzey gerilimi, temas açısı, damla çapı ve sürüklenme oranları üzerindeki spesifik etkilerini sistematik olarak incelemiştir.

İlaçlama uygulamalarında asıl hedef olan başarının sağlanmasında çevresel etkiler göz ardı edilemeyecek boyutta önemlidir. Damla oluşumundan yaprak alımına kadarki her bir formda etkileri görülmektedir. Çevresel faktörler püskürtme ile başlayan uygulamada sıvının meme çıkış hızı, hava tabakasına çarpması ile damla oluşumunun başlaması, damlanın havada ve hedef ulaştıktan sonra buharlaşması ve yaprak difüzyonunu etkileyen radyasyon miktarının ortam sıcaklığını belirlemesi bunun sonucunda bağıl nemin yüzeyde oluşan film tabakasının kalınlığı ve kalıcılığını etkileyerek kurumu süresi üzerinde önemli bir rol üstlenmesi ve aktif madde alımı için gerekli sürenin değişimini belirleyen zincirleme ve entegre olgular olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna karşılık, düşük nem ve yüksek sıcaklık koşulları, film tabakasının hızla kurummasına, yayılmanın tamamlanamamasına ve sonuçta penetrasyon oranlarının düşmesine neden olabilmektedir (Fernández, 2013).

Rüzgâr hızı ve hava akımı, damla yayılımı, ıslanma etkinliği ve sıvı kayıpları açısından önemli parametrelerdir. Düşük hava hızları, püskürtme kalitesinin iyileşmesine katkı sağlarken, yüksek rüzgâr koşulları damlaların bitki yüzeyine tutunmasını zorlaştırmakta ve sürüklenme riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, şiddetli hava akımları, yüzey film tabakasının buharlaşarak hızla incelmeye ve bundan dolayı da aktif madde kayıplarının artmasına yol açabilmektedir (Gossen, 2008).

İlaçlama uygulamalarında beklenen başarıya ulaşmak için teknik parametreler ile çevre koşullarının uygulama özelliklerini etkileyen yönlerinin birlikte değerlendiren entegre model üzerinden optimize edilmesi gerekir. Mumsu yüzeye sahip yaprak yüzeyine yapılacak bir uygulamada damla çapı büyük tutularak yüzeyde oluşacak film tabakasının kalması sağlanabilir. Böylece aktif madde alımı artırılarak performans değeri artırılır. Diğer bir stratejik yaklaşım bağıl nemin nispeten yüksek olduğu sabah ve akşam

saatlerinde ilaçlamanın gerçekleştirilmesi ile yüzeydeki film oluşumunun kalıcılığının sürekliliği sağlanabilir. Damla çapı dağılımının, püskürtme basıncı ve meme seçimiyle optimize edilmesi hem damla tutunma oranlarını artırmakta hem de aktif maddenin yaprak içine penetrasyonunu teşvik etmektedir. Bu kapsamlı optimizasyon, tarımsal üretimde hedeflenen biyolojik etkinliğin sağlanmasında önemli bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yaprak mikroyapısı, surfaktan dinamikleri ve gelecek yönelimleri

Yaprak yüzeyinin mikroyapı özellikleri ile surfaktan davranışları arasındaki ilişki, bitki fizyolojisi, yüzey bilimi ve uygulamalı kimya alanlarında yoğun biçimde incelenmektedir. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü, mumsu tabaka dağılımı, mikropapilla yoğunluğu ve trikom yapısı gibi unsurların pestisit uygulamalarında püskürtme ile oluşan damla çapı, damla yayılma hızı, temas açısı ve film sürekliliği üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Boreyko & Chen, 2009; Latthe & ark., 2014). Ancak bu yaprak yüzey parametrelerin ilaçlamada kullanılan surfaktan tipine ve çevresel koşullara bağlı olarak nasıl etkileştiği hâlâ tam olarak açıklığa kavuşmamıştır.

Yaprak yüzey mikroyapısı, ilaçlamada beklenen ıslanma rejimini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Mum kristallerinin ve mikropapillaların yoğun olduğu yaprak yüzeylerinde damlalar genellikle Cassie–Baxter davranışı gösterirler. Yani damlalar yaprak yüzeyine tam olarak temas etmez, arada hava cepleri oluşur. Bu durumda sıvının yüzey gerilimini düşüren surfaktanlar, oluşan damlaların yaprak yüzeyindeki mikro çıkıntıların arasına sızmasını kolaylaştırarak yayılmayı dolayısıyla ıslanmayı artırabilirler. Diğer taraftan daha pürüzsüz veya hidrofilik yaprak yüzeylerinde ise (Wenzel rejimi), surfaktanlı damlalar daha çok film sürekliliğini koruyarak etkili olurlar (Li & ark., 2020).

Mikroyapısal heterojenliklerin difüzyon mekanizmaları üzerindeki dolaylı etkileri de dikkatle incelenmesi gereken bir konudur. Yüzeydeki mikro düzeydeki çıkıntı ve girintiler, film tabakasının kalınlık dağılımında ve buharlaşma kinetiğinde bölgesel farklılıklara yol açmaktadır. Bu durum, aktif maddenin yaprak içi dokulara taşınma hızında ve yönünde önemli değişkenliklere neden olabilmektedir. Özellikle trikom yoğunluğunun fazla olduğu yaprak yüzeylerinde, bu mikro yapıların damla yayılımı üzerindeki fiziksel bariyer etkisi ve buharlaşma yüzey alanındaki artış, difüzyon süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, mikropapilla yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde oluşan lokal buharlaşma artışı, film tabakasında erken kurumalara ve sonuçta aktif madde alımında azalmaya yol açabilmektedir.

Bu kapsamlı etkileşim ağı, bitki koruma uygulamalarında hedeflenen biyolojik etkinliğe ulaşmak için yaprak yüzey morfolojisi, surfaktan kimyası ve uygulama parametreleri arasındaki optimizasyonun ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır. İleriki araştırmaların, farklı bitki türlerine özgü yüzey morfolojileri ile çeşitli surfaktan formülasyonlarının etkileşim mekanizmalarını daha detaylı incelemesi, tarımsal uygulamaların etkinliğini artırmada belirleyici olacaktır. Bu da bazı bölgelerde etkin difüzyonu hızlandırırken, diğerlerinde geciktirebilir. Özellikle organosilikon ve etoksilat türevleri (noniyonik, etilen oksit zincirli yüzey aktif maddeler) gibi surfaktanların oluşturduğu mikroskobik yeniden düzenlenmeler kutikula lipidlerinin geçici olarak yeniden hizalanmasına yol açarak moleküler taşınımı kolaylaştırabilir (Basílio & ark., 2024; Schreiber, 2005).

Bu süreçlerin çok ölçekli olması, yalnızca fiziksel gözleme bağlı kalarak değerlendirilme yapmaya yetmez, kimyasal ve dinamik modellemeye de ihtiyaç duyar. Son yıllarda yapılan çalışmalar, yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve konfokal raman mikroskopisi gibi

tekniklerle yaprak yüzey morfolojisini üç boyutlu olarak incelemeyi mümkün kılmıştır (Neinhuis & Barthlott, 1997; Koch & ark., 2009). Bu veriler, yüzey enerjisi dağılımı, temas açısı histerezisi ve film yayılma dinamiklerinin sayısal olarak modellenmesini desteklemektedir. Ancak bu modellerin büyük çoğunluğu laboratuvar ortamında elde edilen ideal yüzey verilerine dayanmakta, arazideki değişken mikroklima koşulları (rüzgâr, ışık, nem) çoğu zaman göz ardı edilmektedir.

Gelecekteki araştırmalar, mikrotopografya ve surfaktan etkileşimini çok disiplinli bir çerçevede ele almak zorundadır. Fiziksel gözlemler, kimyasal analizler ve sayısal modellemeler birlikte yürütülmelidir. Özellikle dinamik yüzey geriliminin zamanla değişimini, film kuruma hızını ve kutikula içi difüzyonun farklı surfaktan türlerine tepkisini aynı deney düzeneğinde izleyebilen yöntemlerin geliştirilmesi, literatürde önemli bir boşluğu dolduracaktır (Fernández, 2021). Ayrıca, sürdürülebilir tarım açısından çevreye daha az etkili, biyolojik kökenli surfaktanların (örneğin rhamnolipid ve sophorolipid türevleri) yaprak yüzeyiyle etkileşimi üzerine yapılan çalışmaların artırılması gerekmektedir (Desai & Banat, 1997; Banat & ark., 2010).

Doğal bileşiklerin tarımsal sistemlerde performansı iyileştirebildiği, farklı araştırmalarla da ortaya konmuştur. Tıbbi ve aromatik bitkiler üzerine yapılan bir çalışma, bu tür bileşiklerin büyüme ve kalite üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir (Atay, 2023). Bu durum, bitki yüzeyiyle etkileşime giren biyosurfaktanların da benzer faydalar sağlayabileceğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, yaprak mikroyapısı ile yüzey aktif madde arasındaki dinamikler yalnızca damla yayılma ve ıslanma davranışını etkilememekte, aynı zamanda difüzyon, taşınım ve etken madde alımını da belirleyen bir süreç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla ilgili sonuçların ilerlemesi için deneysel gözlemlerin

sayısal modellemelerle birleştiği yeni bir araştırma yaklaşımının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Güncel Yaklaşımlar ve Gelecek Perspektifleri

Son yıllarda yaprak mikroyapısı ve surfaktan etkileşimi üzerine yapılan çalışmalar yalnızca damlanın nasıl yayıldığı veya difüzyonun hangi hızla gerçekleştiği gibi klasik fizikokimyasal sorulara yanıt aramakla sınırlı kalmamıştır. Araştırma alanı, lotus yaprağının süperhidrofobik karakteri, kaktüsün su toplama mekanizması veya lahana yüzeyindeki mum kristal dizilimi gibi temel süreçlerin mühendislik alanında taklit edilerek su itici kaplamalar, kendini temizleyen yüzey teknolojileri, ıslanabilirlik kontrolü gereken endüstriyel materyallerin yaprak–surfaktan etkileşiminden ilham alınarak çeşitli teknolojilere uyarlanması ile yeni malzeme tasarımlarının gelişimi sağlanmıştır. Surfaktanların yaprak yüzeyinde davranışını anlamak, pestisitlerin ve yaprak gübrelerinin daha düşük dozlarla daha yüksek etkinlik göstermesini sağlar. Yaprak mikroyapısının surfaktanlarla ilişkisini anlaşılması ile kimyasal kullanımının azaltılması, çevresel yükün düşürölmesi, etkin maddelerin daha iyi tutunması ve daha hızlı alımı, yıkanma ve akma yoluyla kimyasal kaybının önlenmesi sağlanabilir. Ayrıca bu yaklaşım çevreye daha az zarar veren tarım sistemlerinin geliştirilmesine destek olur.

Geleneksel surfaktan formölasyonlarının tanımlanmasında çoğunlukla yüzey gerilimi, damla çapı ve temas açısı ölçümlerine dayanmaktadır. Ancak yaprak yüzeylerinin heterojen yapısının anlaşılması pestisit formölasyonlarının üretilmesinde de yeni yaklaşımların gelişmesine yardımcı olmuştur. Buna göre surfaktan geliştirme çalışmalarında, mikropapilla yüksekliği, mum kristal morfolojisi, trikom yoğunluğu, film kalınlığı ve film sürekliliği, kutikula geçirgenliğinin sıcaklık ve nemle değişimi gibi bilgiler doğrultusunda daha ayarlı yayılma hızı, daha stabil film yapısı, daha verimli difüzyon, bitki türüne özel surfaktan uyarlamaları gibi

alışmalar geliştirilmektedir. Yani bu alan, surfaktan kimyasının bitki fizyolojisi temelli bir anlayışla yeniden şekillenmesine yol açmış durumdadır.

Konuyla ilgili yapılan çalışmalar artık tek bir yüzeyin davranışını tanımlamakla sınırlı kalmamaktadır, yüzeyin mikrometre ölçeğindeki pürüzlülük ile makroskobik film oluşumu arasındaki köprüyü kurmayı da hedeflemektedir. Yaprak yüzeylerinde hem morfolojik hem de kimyasal znrlğ bir arada sunmak için üç boyutlu yüzey taramaları, konfokal raman mikroskopisi, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve yüksek hızlı optik görüntüleme gibi yöntemler kullanılmaktadır (Koch & ark., 2009; Bhushan, 2016). Bu sayede yüzey enerjisi, mumsu tabakanın kristal yapısı ve surfaktan birikim bölgeleri üç boyutlu olarak haritalanabilmektedir. Son yıllarda geliştirilen mikroakışkan damla sistemleri, yüzey aktif maddelerin (surfaktan) dinamik yüzey gerilimindeki değişimleri milisaniye düzeyinde ölçebilmektedir. Bu yöntem, geleneksel ölçüm cihazlarına kıyasla çok daha hassas veriler sunmaktadır (Chatzipantelidis & ark., 2023).

Yapay zekâ destekli modelleme ve görüntü analizi de giderek daha fazla kullanılmaktadır. Derin ğrenme yöntemleri, bir damlanın temas açısı, yayılma hızı ve stabilite (kararlılık) gibi özelliklerini otomatik olarak analiz edebilmenin yanı sıra yüzey aktif maddelerin etkinliğini tahmin etmek için yeni ve güçlü bir araç olarak ta kullanılabilmektedir (Zhang & ark., 2022). Böylece farklı bitki türleri ve surfaktan tipleri için geniş veri setlerinden tahmine dayalı modeller oluşturmak mümkün hale gelmektedir.

Bir diğer güncel yönelim, biyosurfaktanların tarımsal uygulamalarda giderek artan kullanımıdır. Rhamnolipid, sophorolipid ve mannosylerythritol lipid gibi doğal kökenli yüzey aktif maddeler hem evre dostu olmaları hem de yaprak lipid tabakalarıyla biyoyumlu etkileşim göstermeleri nedeniyle geleneksel sentetik surfaktanlara alternatif oluşurmaktadır (Banat &

ark., 2010; Singh & ark., 2019). Bu bileşiklerin, kutikula lipitleriyle daha kontrollü etkileşim kurarak kalıcı yapısal hasar riskini azaltabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, biyolojik kaynaklı yüzey aktif maddelerin (biyosurfaktan) mikrop öldürücü özelliği, yaprak yüzeyindeki zararlı mikrop oluşumunu azaltmaya da yardımcı olabilir.

Geleceğe bakıldığında, bu araştırma alanının tarımla sınırlı kalmayacağı öngörülmektedir. Yaprak yapısı örnek alınarak geliştirilen doğa dostu kaplamalar, su iten, kendi kendini temizleyen ve kir tutmayan yüzeylerin tasarımında şimdiden kullanılmaya başlamıştır (Barthlott & Neinhuis, 1997; Koch & Bhushan, 2008). Benzer şekilde, yüzey aktif maddelerin (surfaktan) davranışlarının anlaşılması, tarım ilacı ve nanoemülsiyon teknolojilerinde yeni tasarım olanakları sunmaktadır.

İleriki dönem araştırmalarının, disiplinler ötesi bir anlayışla tasarlanması gerekmektedir. Yüzey bilimleri, moleküler düzeyde modelleme, bitki fizyolojisi ve çevre kimyasının ortak çalışma platformu oluşturması, yüzey aktif maddeler ile bitki yüzey mikromorfolojisi arasındaki karşılıklı ilişkilerin daha isabetli şekilde modellenebilmesine olanak tanıyacaktır. Aynı zamanda, arazi koşullarında elde edilen gözlemlere dayalı verilerin laboratuvar ortamında geliştirilen teorik modellerle entegrasyonu ve kontrollü koşullarda üretilen deneysel bulguların karşılaştırmalı analizi, doğal ekosistem ile yapay deney düzenekleri arasındaki tutarlılığın güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bütünlük metodoloji, hem akademik anlamda geçerliği yüksek sonuçların elde edilmesine hem de bu sonuçların pratik tarım uygulamalarına etkin biçimde aktarılmasına hizmet edecektir.

Yaprak yüzeyi ile surfaktan maddeler arasındaki etkileşim mekanizmalarını konu alan güncel çalışmalar artık yalnızca bitki yapraklarının yaprak gübresini veya pestisidi nasıl aldığı düzeyinde ele almamakta hem yüzey kimyası hem malzeme bilimi hem de

sürdürülebilir tarım açısından yeni yaklaşımlar ortaya koymaktadır. Yeni yaklaşımlarda yaprak yüzeyinin mimarisinin malzeme bilimi açısından benzersiz olduğu, surfaktanların bu yüzeylerdeki davranışlarının yeni malzeme tasarımlarına ilham verdiği, difüzyon ve film dinamiğinin akışkanlar fiziği ve yüzey enerjisi bilimi ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Günümüzde bu alandaki çalışmalar moleküler kimya, botanik, yüzey bilimi, nanoteknoloji, görüntüleme teknolojileri, veri analitiği, yapay zekâ destekli modelleme gibi çok farklı alanların yöntemlerini bir araya getirmektedir. Bu çalışmalarda yüzey mimarisi, moleküler etkileşim ve çevresel koşullar birlikte değerlendirilmektedir. Diğer taraftan biyolojik kökenli yeni nesil surfaktanların araştırmaya dahil edilmesi ile daha düşük toksisiteye sahip, daha hızlı biyolojik olarak parçalanabilir, çevresel etkileri daha düşük surfaktanların kullanılması tarımsal formülasyonlarda sürdürülebilirliğe doğru bir yönelim yaratmaktadır. Yaprak yüzeylerinin konfokal raman mikroskopisi, AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu), 3B optik profilometri, yüksek çözünürlüklü SEM, mikroakışkan test sistemleri gibi çok yüksek çözünürlüklü teknikler ile incelenmesi surfaktanların film içinde nasıl hareket ettiğini, yüzeyde nasıl dağıldığını, kutikula içerisinde nasıl ilerlediğini mikro ölçeğe ve gerçek zamanlı olarak görmemizi sağlar. Bu, 10 yıl önce mümkün olmayan bir analiz düzeyidir. Son teknolojik yöntemler yüzey enerjisi modellerinin, Navier–Stokes tabanlı film yayılma simülasyonlarının, yapay zekâ destekli görüntü analizlerin, difüzyon–evaporasyon dengesini hesaplayan algoritmaların, kutikula yapısına özgü mikrokanal modellerinin anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu modeller, deneysel verilerle birleştğinde mikroyapı, film davranışı, difüzyon, alım zincirinin tamamını açıklayabilir hâle gelmektedir.

Bu bağlamda, nanoteknolojik uygulamalar ve akıllı malzeme geliştirme çalışmalarının, söz konusu araştırma alanına önemli

katkıları sunacağı öngörülmektedir. Yapay zeka destekli veri analizi ve makine öğrenmesi algoritmalarının, yaprak yüzey özellikleri ile surfaktan davranışları arasındaki karmaşık ilişkilerin açıklanmasında önemli rol oynayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir tarım ilkeleri doğrultusunda, çevresel etkisi minimize edilmiş ve biyolojik olarak parçalanabilir yeni nesil surfaktan formülasyonlarının geliştirilmesi, bu alandaki en öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Tüm bu gelişmelerin, tarımsal üretimde verimlilik ile ekolojik sürdürülebilirlik arasında optimal dengeyi kurabilecek yenilikçi uygulamaların önünü açacağı değerlendirilmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın amacı, surfaktanların yaprağa giriş sürecini yalnız başına incelemek değil, bu süreci belirleyen mikroyapısal öğeler, ıslanabilirlik özellikleri, difüzyon koşulları ve çevresel faktörlerle olan çok yönlü bağlantısını bütüncül şekilde ortaya koymaktır. Surfaktanların etkinliğini belirleyen temel faktörlerin daha iyi anlaşılabilmesi için yüzey morfolojisi, yayılma ve ıslanma davranışı, kutikula yapısı ve çevresel koşulları birlikte değerlendirilmesinden olumlu sonuçların ortaya çıkacağı anlaşılmaktadır.

Surfaktanların yayılma, film oluşturma ve difüzyon davranışlarını, yaprak yüzeyinin mikro düzeydeki yapısı, mumsu tabaka kristalleri, mikropapillalar ve trikomlar doğrudan etkilemektedir. Surfaktanlar hidrofobik yüzeylerde damlanın pürüzlü alanlara nüfuz etmesini yüzey gerilimini düşürerek kolaylaştırırken, daha hidrofilik yüzeylerde film sürekliliğini koruyarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, tek bir surfaktan tipinin tüm bitki türlerinde aynı etkinliği göstermeyeceğini, dolayısıyla yüzey özelliklerine uyumlu formülasyonların geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kutikula içi difüzyon ve taşınım süreçleri, hem surfaktanın kimyasal yapısı hem de çevresel faktörlerle belirlenir. Yüksek bağıl nem koşulları hidrofilik bileşiklerin alımını artırırken, sıcak ve kuru koşullarda lipofilik bileşikler avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, tarımsal uygulamalarda uygulama zamanı, damla boyutu, püskürtme basıncı ve çevresel nem birlikte değerlendirilmelidir.

Son yıllarda gelişen analitik yöntemler (konfokal raman mikroskopisi, AFM ve mikroakışkan sistemler) yaprak yüzeyinde hem kimyasal hem morfolojik çözünürlüğü artırmış olup surfaktan dinamiklerinin daha ayrıntılı biçimde izlenmesine olanak sağlamıştır. Diğer taraftan yapay zekâ destekli görüntü analizi ve sayısal modelleme yaklaşımları, surfaktan etkinliğini tahmin edebilen algoritmaların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmalar, farklı yüzey özellikleri için optimum surfaktan seçimini bilimsel verilere dayandırma potansiyeli taşımaktadır.

Son dönem bilimsel çalışmalar, tarımda kullanılan kimyasal maddelerin çevresel etkilerinin azaltılması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, geleneksel sentetik surfaktanların yerine doğal kökenli, biyolojik olarak parçalanabilir yüzey aktif maddelere yönelmektedir. Rhamnolipid, sophorolipid ve mannosylerythritol lipid gibi biyosurfaktanlar bu kapsamda öne çıkan bileşiklerdir. Bu bileşiklerin daha düşük toksisiteye sahip olmaları, doğada daha hızlı parçalanmaları, çevresel kalıntı bırakmamaları ve yaprak yüzeyindeki doğal lipid tabakalarıyla daha uyumlu etkileşim göstermeleri nedeniyle sentetik surfaktanlara tercih edilmektedir. Başka bir ifadeyle, biyosurfaktanlar bitkinin kutikula yapısına daha yumuşak bir şekilde yaklaşarak yüzey bütünlüğünü bozmadan yayılma ve difüzyon özelliklerini düzenleyebilmeleri bunları öne çıkarmaktadır. Ancak bu bileşiklerin gerçek potansiyellerinin ortaya konulması için laboratuvarla elde edilen sonuçların arazideki gerçek koşullarla uyumlu olması gerekir. Çünkü surfaktan performansı iklimsel koşullara göre önemli ölçüde

değişir. Bu nedenle iklim parametrelerinin deney tasarımlarına entegre edilmesi hem biyosurfaktanların hem sentetik surfaktanların performansını daha doğru değerlendirmeye yardımcı olacaktır. Bunun için sentetik surfaktanlarla karşılaştırmalı çalışmalar yapılması, deneylerin standart bir protokole göre tekrarlanabilir şekilde yürütülmesi, deneysel değişkenlerin (sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı gibi çevresel faktörlerin) kontrollü biçimde modellenmesi gerekmektedir. Elde edilen sonuçların geliştirilmesinde aşağıdaki önerilerin dikkate alınması önem taşımaktadır (Sachdev & Cameotra, 2013; Dini & ark., 2024).

1. Biyosurfaktanlar, geleneksel sentetik surfaktanlarla aynı koşullar altında test edilmeli ve sonuçlar doğrudan kıyaslanmalıdır.
2. Deneylerde kullanılan uygulama dozları, çözeltinin pH'ı, yüzey gerilimi ölçüm yöntemleri ve deney süreleri standart hâle getirilmelidir. Böylece farklı araştırmalar arasında güvenilir karşılaştırma yapılabilir.
3. Sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı gibi çevresel faktörler kontrollü biçimde modellenmeli veya simüle edilmelidir. Çünkü surfaktan performansı bu değişkenlerden güçlü biçimde etkilenir.
4. Laboratuvarda elde edilen bulgular mutlaka tarla koşullarında tekrar edilmeli, gerçek ortam ile laboratuvar arasındaki farklılıklar belirlenmelidir.
5. Farklı bitkilerin kutikula yapısı ve mikroyapısı değiştiği için, her tür için ayrı testler yapılması daha doğru sonuç verir.
6. Surfaktanların yayılma davranışı, film kalınlığı ve kuruma hızı çok önemlidir. Bu parametreler düzenli ve hassas ölçüm cihazlarıyla izlenmelidir.

7. Toksisite düzeyi düşük, biyolojik olarak parçalanabilir surfaktanların geliştirilmesi ve test edilmesi sürdürülebilirlik açısından öncelikli olmalıdır.
8. Basit görüntü analiz programları veya makine öğrenimi destekli araçlar, damla yayılma davranışını daha doğru ve hızlı analiz etmeye yardımcı olabilir.
9. Hem yüzey özelliklerini hem çevresel koşulları hem de kimyasal bileşimi aynı anda değerlendiren modeller, daha güvenilir sonuçlar verebilir.
10. Elde edilen verilerin pratik tarım uygulamalarına nasıl yansıtılacağı açıkça değerlendirilmelidir. Örneğin doğru uygulama zamanı, damla büyüklüğü veya konsantrasyon ayarı gibi.

Yaprak yüzeyi ile surfaktanlar arasındaki ilişkiyi inceleyen son çalışmalar, bu alanın artık sadece tarım bilimi içinde değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Bu araştırmalar, yüzey kimyası, biyoteknoloji ve malzeme bilimi gibi farklı disiplinleri bir araya getirmektedir. Bu çok yönlü yaklaşım, bitki sağlığını korumaya yönelik yeni yöntemlerin geliştirilmesine ve bitki yüzeylerinden ilham alan özel yüzey tasarımlarının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Mevcut bilimsel bulgular, teknolojik ilerlemeler ve disiplinler arası iş birlikleri sayesinde yaprak-surfaktan etkileşiminin daha iyi anlaşılacağını ve elde edilen bilgilerin pratik tarım uygulamalarına yansıtılacağını göstermektedir. Özellikle nanoteknoloji ve akıllı malzemeler üzerine yapılan çalışmaların, çevre dostu ve hedefe yönelik yeni surfaktan formülasyonlarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

Atay, A. (2023). The effect medicinal plants on performance, carcass parameters and meat quality in broiler chickens. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 1418–1428. <https://doi.org/10.21597/jist.1229416>

Banat, I. M., Makkar, R. S., & Cameotra, S. S. (2010). Potential commercial applications of microbial surfactants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(2), 427–444. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2589-0>

Baratella, V., & Trinchera, A. (2018). Organosilicone surfactants as innovative irrigation adjuvants: Can they improve water use efficiency and nutrient uptake in crop production? *Agricultural Water Management*, 204, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.003>

Barthlott, W., & Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s004250050096>

Basílio, N., Simões, R., & Silva, E. (2024). Effect of adjuvants on spray droplet behavior and drift potential. *Agriculture*, 14(12), 2271. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>

Bhushan, B. (2016). *Springer Handbook of Nanotechnology* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3>

Boreyko, J. B., & Chen, C.-H. (2009). Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces. *Physical Review Letters*, 103(17), 174502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.174502>

Brewer, C. A., Smith, W. K., & Vogelmann, T. C. (1991). Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant, Cell & Environment*,

14(9), 955–962. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb00965.x>

Chatzipantelidis, P., Papadopoulos, D., & Athanassiou, A. (2023). Microfluidic approaches for dynamic surface tension measurements of surfactant solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 670, 131624. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131624>

Desai, J. D., & Banat, I. M. (1997). Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61(1), 47–64. <https://doi.org/10.1128/mmbr.61.1.47-64.1997>

Dini, S., Ostovan, F., & Saeedi, M. (2024). The physicochemical and functional properties of biosurfactants: Green and versatile surface-active agents. *Molecules*, 29(11), 2544. <https://doi.org/10.3390/molecules29112544>

Eichert, T., & Goldbach, H. E. (2008). Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake pathways in stomatous and astomatous leaf surfaces—Further evidence for a stomatal pathway. *Physiologia Plantarum*, 132(4), 491–502. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01029.x>

Fernández, V. (2021). Plant surface properties and their characterization: Towards understanding leaf surface–chemical interactions. *The Plant Journal*, 105(2), 339–356. <https://doi.org/10.1111/tpj.15038>

Fernández, V., & Brown, P. H. (2013). From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in Plant Science*, 4, 289. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>

Fernández, V., & Eichert, T. (2009). Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and

perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(1–2), 36–68.
<https://doi.org/10.1080/07352680902743069>

Gaskin, R. E., Murray, R. J., & Ray, J. W. (1996). Interaction of organosilicone surfactant concentration and spray application factors in glyphosate efficacy. *Proceedings of the New Zealand Plant Protection Conference*, 49, 183–187.
<https://doi.org/10.30843/nzpp.1996.49.11416>

Gossen, B. D. (2008). Influence of environmental conditions on the efficacy of foliar-applied pesticides. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 30(4), 484–492.
<https://doi.org/10.1080/07060660809507550>

Khayet, M., & Fernández, V. (2012). Estimation of the solubility parameter of model plant surfaces and agrochemicals: A valuable tool for understanding plant surface interactions. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 9, 45.
<https://doi.org/10.1186/1742-4682-9-45>

Knoche, M. (1994). Physicochemical aspects of foliar penetration. *Pesticide Science*, 42(2), 165–182.
<https://doi.org/10.1002/ps.2780420208>

Koch, K., & Bhushan, B. (2008). Fabrication of artificial Lotus leaves and superhydrophobic membranes. *Soft Matter*, 4(10), 1943–1963. <https://doi.org/10.1039/B804854A>

Koch, K., Bhushan, B., & Barthlott, W. (2009). Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces: An overview. *Progress in Materials Science*, 54(2), 137–178.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.07.003>

Kolyva, F., Stratakis, E., Rhizopoulou, S., Chimona, C., & Fotakis, C. (2012). Leaf surface characteristics and wetting in

Ceratonia siliqua L. *Flora*, 207(8), 551–556.
<https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.06.001>

Latthe, S. S., Terashima, C., Nakata, K., & Fujishima, A. (2014). Superhydrophobic surfaces developed by mimicking hierarchical surface morphology of lotus leaf. *Molecules*, 19(4), 4256–4283. <https://doi.org/10.3390/molecules19044256>

Li, Y., Wang, H., Chen, X., & Liu, H. (2020). Optimization of spraying parameters for uniform pesticide deposition on crop leaves. *Agronomy*, 10(5), 747.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10050747>

Mullin, C. A., Fine, J. D., Reynolds, R. D., & Frazier, M. T. (2016). Toxicological risks of agrochemical spray adjuvants: Organosilicone surfactants may not be safe. *Frontiers in Public Health*, 4, 92. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00092>

Neinhuis, C., & Barthlott, W. (1997). Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany*, 79(6), 667–677. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0400>

Ou, Y., Li, Y., Lv, L., & Li, H. (2023). Effects of leaf microstructures on the water storage capacity of common urban landscape trees. *Ecohydrology*, 16(3), e2538.
<https://doi.org/10.1002/eco.2538>

Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena* (4th ed.). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118228920>

Sachdev, D. P., & Cameotra, S. S. (2013). Biosurfactants in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(3), 1005–1016. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4641-8>

Schreiber, L. (2005). Polar paths of diffusion across plant cuticles: New evidence for an old hypothesis. *Journal of*

Experimental Botany, 56(415), 2403–2411.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eri231>

Singh, P., Patil, Y., & Rale, V. (2019). Biosurfactant production: Emerging trends and promising strategies. *Sustainability*, 11(12), 3280. <https://doi.org/10.3390/su11123280>

Toraman, M. C. (2019). Effects of Leaf Surface Energy on Pesticidal Performance. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 25(2), 174–180. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.382143>

Toraman & Bayat M. C. (2015). Bitki Koruma İlaçlarına Uygulanacak Yayıcıcı ve Yapıştırıcı Seçiminde Etkili Faktörler. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi* 11 (3), 187-193

Wang, C. J., & Liu, Z. Q. (2007). Foliar uptake of pesticides—Present status and future challenges. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 87(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2006.04.004>

Wang, H., Shi, H., Li, Y., Yu, Y., & Wang, Y. (2014). The effects of leaf roughness, surface free energy and work of adhesion on leaf water storage capacity. *PLoS ONE*, 9(9), e107062. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107062>

Wohlfahrt, G., Bianchi, K., & Cernusca, A. (2006). Leaf and stem maximum water storage capacity of herbaceous plants in a mountain meadow. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.036>

Wyatt, S. K., Kruger, G. R., & Johnson, W. G. (2018). Effects of spray droplet size on pesticide performance and drift potential. *Crops & Soils Magazine*, 51(2), 18–22. <https://doi.org/10.2134/cs2018.51.0207>

Yarin, A. L. (2006). Drop impact dynamics: Splashing, spreading, receding, bouncing.... *Annual Review of Fluid*

Mechanics, 38, 159–192.
<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092144>

Zhang, H., Zhao, L., & Li, J. (2022). Deep learning-based analysis of pesticide droplet spread dynamics on crop leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107174. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107174>

Zhang, X., Li, S., Zhang, H., et al. (2022). How does solubilisation of plant waxes into nonionic surfactant micelles affect pesticide release? *Journal of Colloid and Interface Science*, 587, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.12.01>

BÖLÜM 4

FORAGE HARVESTERS

MAKSUT BARIŞ EMİNOĞLU¹
UFUK TÜRKER²

Introduction

When given to animals in normal amounts, any orally administered substance containing organic and inorganic nutrients that does not harm the animals' health, meets their maintenance and production requirements, and can be defined as feed (Anonymous a,b 2022). Feeds can be classified according to their source, nutrient density, and feed law, but they can be simply categorized as roughages, concentrates, and feed additives. Roughages are animal feeds, mostly of plant origin, that grow under natural conditions, are natural in quality, and are low in energy. They are used in fresh, dried, or silage form. It is particularly important for the nutrition of ruminants (cud-chewing animals) (Anonymous b, 2022). The main roughage sources used in our country are: meadows, forage crops, silage, in-garden grazing, straw and stubble. In addition to these,

¹ Asst. Prof. Dr., Ankara University, Department of Agricultural Machinery and Technologies, Orcid: 0000-0003-3264-3636

² Prof. Dr., Ankara University, Department of Agricultural Machinery and Technologies, Orcid: 0000-0002-7527-7376

vegetable, fruit, and other food industry pulp and residues can also be used as roughage sources (Anonymous c, 2022).

According to data from the Turkish Statistical Institute, in 2024, the following green grasses were produced in our country for use as animal feed: 17.3 million tons of alfalfa, 3.2 million tons of cow vetch, 4.7 million tons of oats, 1.4 million tons of sainfoin, 2 million tons of Italian ryegrass, 6.9 million tons of meadow grass, 1.2 million tons of triticale, 570 thousand tons of barley, and 349 thousand tons of wheat. Additionally, 27.1 tons of silage maize were produced for use in animal feed.

The first examples of forage harvesters were animal-drawn machines (Figure 1). These machines are iron-wheeled machines. The machine's mowing system works by the wheel on the machine rotating, transmitting movement from this wheel to the gears, from the gears to the crank-connecting rod mechanism, and from there, transmitting the movement to the blades. The sickle blades attached to the knife blade move back and forth between the finger blades, cutting the crop to be harvested.

Figure 1 Horse-drawn mower



Reference: Anonymous d, 2025. (On 12/10/2025 Accessed from https://www.farmshow.com/a_article.php?aid=35286)

As seen in the example in Figure 1, the horse-drawn mower has a simple structure in terms of mechanism and the number of moving elements, and it leaves the cut crop on the field. Beside this machine, there are also winged sickle mowers that convey the cut crop onto their platform, or machines called harvesters that bind the cut crop into sheaves and leave them in the field.

Today, with the introduction of tractors as a power source in agriculture, animal-drawn machines have been replaced by tractor-mounted mowers (Figure 2). These machines are attached to the tractor's three-point hitch system.

Figure 2 Tractor-mounted mower (Anonymous e, 2025)



Reference: Anonymous e, 2025. (On 08/11/2025 Accessed from <https://www.gurbuztarim.com.tr/tr/urun/tek-bicakli-bicme-makinasi/>)

In the sickle mower attached to the tractor shown in Figure 2, motion is transmitted from the tractor's power take-off to the belt-pulley system and then to the blades via a crank-connecting rod mechanism. These types of mowers are suitable for tractors with 35 to 70 horsepower, although this varies depending on the cutting width. When the mowing pattern encounters an obstacle, it opens backward, and returns to its original position after the obstacle is cleared.

There are mowing system applications with a mechanism that transmits motion separately to the bar to which the finger knives are attached and the bar to which the leaf knives are attached in the mower machines attached to the tractor (Figure 3).

Figure 3 Two-blade reciprocating mower (Anonymous f, 2025)



Reference: Anonymous f, 2025. (On 10/11/2025 Accessed from <https://www.gurbuztarim.com.tr/tr/urun/cift-bicakli-bicme-makinasi>)

The mower shown in Figure 3 has two separate blade arms that move back and forth in opposite directions relative to each other, cutting the crop between the finger blades and the triangular blades. There are benefits to attaching mowing machines to tractors with a reciprocating cutting system, such as high forward speeds during operation, the blades self-cleaning and sharpening while working, and a low probability of foreign materials like stones or branches getting caught between the blades. In contrast, single-blade mowing is more expensive than moving mowing machines due to the large number of moving parts that make up the mowing mechanism. In

reciprocating mowers, the knife bar is set 30 cm ahead of the inner shoe for every 1 meter of working width. Thus, the effect of the resistance pushing back the blade from the blade's thrust, caused by the resistance and forward speed of the harvested crop, can be eliminated. Another adjustment that can be made on reciprocating mowers is the right and left parallelism adjustment of the knife blade. This adjustment can be made using the tractor's three-point linkage system and the hydraulic cylinder on the mower.

In recent years, lightweight mowers have been produced that can be steered on the field by transmitting motion from their own engine to the wheels located behind the cutting mechanism (Figure 4).

Figure 4 Motorized single-axle mower (Anonymous g, 2025)



Reference: Anonymous g, 2025. (On 11/11/2025 Accessed from <https://www.semak.com.tr/111653-bt-140-gx200-eur5-cayir-bicme-makinesi-115cm>)

The engine on the mower shown in Figure 4 transmits motion to both the walking gear and the cutting unit. The smallest types of these machines have a diesel engine with a rated power of approximately 6 horsepower. The machine can operate at different speeds using the gear lever and throttle valve located on the machine.

While working widths vary depending on the manufacturer, they can range from 0.9 to 1.3 meters between engines. Because they are lightweight and simple in construction, they can be used on small plots of land and sloping areas.

These machines, which have their own engines, are available in three or four-wheeled models with diesel engines, 4 forward and 1 reverse gear, with the engine, control elements, and seat mounted on a chassis. There are models that function as combine harvesters, which gather the cut crop above the cutting mechanism in four-wheeled models and release it in bundles onto the ground between the front and rear axles (Figure 5).

Figure 5 Motorized Combine Harvesters (Anonymous h, 2025)



Reference: Anonymous h, 2025. (On 13/10/2025 Accessed from <https://zimasziraat.com/index.php/urunler/hasat-makineleri/bcs-841000006-622-uc-tekerlekli-bicerbaglar-makinesi-nOFH5A-8xNLYF>)

The motorized combine harvesters seen in Figure 5 transmit motion to the walking mechanism, the cutting mechanism, and the bundling mechanism using the 12HP diesel engine on them. With the

transmission it has, it can go forward in 4 different speed ranges and backward in one speed range. The pedal located in the middle of the chassis allows for switching between road position and work position. The working width is 1.4 meters.

In roughage harvesting machines, the movement of the knives located in the cutting unit can be linear (reciprocating), and machines with a cutting system that harvests forage crops with rotary motion are frequently encountered. Those of these machines that are attached to a tractor transmit the rotational movement they receive from the power take-off to the blades via belts, pulleys, chain sprockets, or bevel gears and shafts.

In machines with a drum mowing system, the movement from the tractor's power take-off is transmitted from above. Drum mowers cut the crop by rotating it in a horizontal plane. These machines typically harvest the crop by blades striking the plant, which are placed on the base of two or more drums (Figure 6).

Figure 6 Drum mower (Anonymous i, 2025)



Reference: Anonymous i, 2025. (On 19/10/2025 Accessed from <https://www.narasmakina.com/urun/tamburlu-cayir-bicme-makinesi/#>)

In the drum mower shown in Figure 6, the machine is moved to the road and working positions using a hydraulic piston on the

machine. There are blades pivotally attached to the bottom of inverted cone-shaped drums. The number of blades on a drum can be 4, 6, or more. Drum mowers can be operated with tractors ranging from 30 to 70 horsepower, depending on the working width. During work in the field, stones are thrown around due to the rotational movement of the drums. Therefore, the tops and sides of the drums can be covered with a protective layer. Depending on the machine's structure, there may be different cutting height adjustment systems. Machines with a drum mowing system have different mowing height adjustments. These adjustment arrangements can be made according to the machine's structure, using the adjustment lever, belt and pulley arrangements, rotating the handle on the drum around its own axis, or by adding a ring to the part where the slide is connected to the drum. Before starting the cutting process in drum machines, the blades must reach the desired speed. Speed must be maintained during mowing. Drums must be operated in a balanced manner. It should not be operated with a single blade; there should be blades working in pairs around the drum. The tension of the belt transmitting motion to the blades should be checked before anything else. (Güner & Keskin, 2011)

There are types of drum mowers that have their own engine and can be steered across the field by an operator (Figure 7).

Figure 7 Motorized drum mower (Anonymous j, 2025)



Reference: Anonymous j, 2025. (On 10/10/2025 Accessed from <https://www.aykatr.com/products/detail/67694eacea67d475b26779bb>)

In the drum mower with a diesel engine shown in Figure 7, the rotary motion of the drums and the movement of the machine are provided by the engine located on it. This machine, preferred especially for small plots, leaves the cut crop in strips in the field and can move forward at three different speeds and backward at one speed.

In disk mowers that harvest forage crops with the rotating motion of the blades, the rotating motion taken from the tractor's power take-off is transmitted to the disks from below (Figure 8). Disk mowers, which are connected to the tractor's three-point linkage system and consist of a single mowing unit, can be operated with tractors ranging from 35 to 75 horsepower.

Figure 8 Disk Mower (Anonymous k, 2025)



Reference: Anonymous k, 2025. (On 06/12/2025 Accessed from <https://www.celmak.com/tr/urun-5li---6li-diskli-sikmali-Cayir-bicme-makinasi-1646.html>)

The disk mower shown in Figure 8 cuts by rotating horizontally, similar to a drum mower. Typically, the working width of models connected to the tractor's three-point linkage system is up to 3 meters. In pull-type mowers, which are used with high-power

tractors that have a power take-off at the front, and in disk mowers, the working widths exceed 12 meters. These wide mowers can be operated with tractors of 200 horsepower and above. Disk mowers have auxiliary arrangements consisting of rubber rollers or fingers positioned along the working width behind the mowing unit, rotating in opposite directions. These arrangements ensure that the feed value of the harvested crop is preserved while operating at high forward speeds, and that the barrels are left suitable for operations such as baling. On disk mowers, the cutting height can be adjusted by adding skids to the bottom of the disks to increase the cutting height. The left-right parallelism adjustment of the mowing system can be made using the tractor's lower link arms and the hydraulic cylinder that controls the lowering and raising of the mower. Beside these models, self-propelled disk mowers, as seen in Figure 9, have started to be used in our country in recent years.

Figure 9 Self-propelled mover conditioner (Anonymous 1, 2025)



Reference: Anonymous 1, 2025. (On 08/09/2025 Accessed from <https://www.krone-northamerica.com/products/mower-conditioner/big-m-450>)

The self-propelled mover conditioner shown in Figure 9 has a working width of 9.9 meters. The cutting units located on the sides

of the road position are perpendicular to the ground plane. The machine's wheels and other moving units are driven by the 6-cylinder, 449 HP engine on the machine. The machine's functions during operation are electronically controlled from the operator cabin.

The machinery used for harvesting roughage varies. When choosing machinery for the business, the business size, the farm's roughage needs, and the farm's existing machinery and equipment should be considered first. After these criteria, ease of maintenance and service network, as well as the initial cost of the machine, become important factors. Regardless of whether they have simple or complex components, machines should not be neglected when it comes to maintenance. Especially at the beginning and end of the harvest season, worn blades should be replaced with new ones, and moving parts should be lubricated. Additionally, protecting the machine from adverse weather conditions at the end of the harvest season will extend its lifespan.

References

Anonymous a, 2025. (On 10/10/2025 Accessed from https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/nurcanc/72802/2_Yemler%20Yem%20Hij_Teknolojis.ppt)

Anonymous b, 2025. (On 15/10/2025 Accessed from <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/usyamak/68880/yemler%20bilgisi.pdf>)

Anonymous c, 2025. (On 10/09/2025 Accessed from <http://www.yem.org.tr/DosyaMerkezi/karma%20yem%20sana yii%20raporu%202019.pdf>)

Anonymous d, 2025. (On 12/10/2025 Accessed from https://www.farmshow.com/a_article.php?aid=35286)

Anonymous e, 2025. (On 08/11/2025 Accessed from <https://www.gurbuztarim.com.tr/tr/urun/tek-bicakli-bicme-makinasi/>)

Anonymous f, 2025. (On 10/11/2025 Accessed from <https://www.gurbuztarim.com.tr/tr/urun/cift-bicakli-bicme-makinasi>)

Anonymous g, 2025. (On 11/11/2025 Accessed from <https://www.semak.com.tr/111653-bt-140-gx200-eur5-cayir-bicme-makinesi-115cm>)

Anonymous h, 2025. (On 13/10/2025 Accessed from <https://zimasziraat.com/index.php/urunler/hasat-makineleri/bcs-841000006-622-uc-tekerlekli-bicerbaglar-makinesi-nOFH5A-8xNLYF>)

Anonymous i, 2025. (On 19/10/2025 Accessed from <https://www.narasmakina.com/urun/tamburlu-cayir-bicme-makinesi/#>)

Anonymous j, 2025. (On 10/10/2025 Accessed from <https://www.aykatr.com/products/detail/67694eacea67d475b26779bb>)

Anonymous k, 2025. (On 06/12/2025 Accessed from <https://www.celmak.com.tr/urun-5li---6li-diskli-sikmali-Cayir-bicme-makinasi-1646.html>)

Anonymous l, 2025. (On 08/09/2025 Accessed from <https://www.krone-northamerica.com/products/mower-conditioner/big-m-450>)

Güner, M. & Keskin, R., 2011. Hasat Harman Makinaları Ders Kitabı, Ankara Üniversitesi Basımevi-Ankara

TÜİK, 2025. Yem bitkileri üretim miktarları, (On 08/09/2025
Accessed from
<https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>)

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*