

TARIMDA TEKNOLOJİ VE ENERJİ YÖNETİMİ

Editörler

Prof. Dr. Mehmet Fırat BARAN

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY



ISBN 978-625-5753-33-5
Ankara -2025

TARIMDA TEKNOLOJİ VE ENERJİ YÖNETİMİ

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Mehmet Fırat BARAN
Siirt Üniversitesi
ORCID ID: 0000-0002-7657-1227

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY
Mardin Artuklu Üniversitesi
ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

YAZARLAR

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK¹

Prof. Dr. Üstün ŞAHİN²

Prof. Dr. Murad ÇANAKCI³

Prof. Dr. Eyüp Selim KÖKSAL⁴

Prof. Dr. Cengiz KARACA⁵

Prof. Dr. Gürkan Alp Kağan GÜRDİL⁶

Prof. Dr. Yılmaz BAYHAN⁷

Doç. Dr. Hakkı SOY⁸

Doç. Dr. Bahadır DEMİREL⁹

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY¹⁰

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir AYANOĞLU¹¹

Dr. Erhan KAHYA¹²

Dr. Zinnur GÖZÜBÜYÜK¹³

Arş. Gör. Osman Mert YAZ¹⁴

Öğr. Gör. Mustafa GERGER¹⁵

Bilg. Müh. Alper BAYRAM¹⁶

Mesut Cemal ADIGÜZEL¹⁷

Onur İlyas YAVUZ¹⁸

Akın ÜN¹⁹

Ertan KAPLAN²⁰

Yusuf İslam KALKAN²¹

Abdulkadir BAL²²

Ahmet Bedei EMEN²³

Abdullah Suat NACAR²⁴

Ahmet Tahsin ÖZTAŞ²⁵

Fatih KESKİNKILIÇ²⁶

Nihat Bora ATMACA²⁷

¹Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

hhozturk@cu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0001-6904-5539

²Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Öğretim Üyesi Erzurum-Türkiye

ussahin@atauni.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-1924-1715

³Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Fakültesi, 07070, Antalya, Türkiye

mcanakci@akdeniz.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-1985-8387

⁴Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Atakum, Samsun, Türkiye,

eselim@omu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-5103-9170

⁵Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

ckaraca@mku.edu.tr

ORCID ID: 0000-0001-5161-1512

⁶Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği, Samsun, Türkiye

ggurdil@omu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0001-7764-3977

⁷Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ-Türkiye

ybayhan@nku.edu.tr

ORCID ID: 0000-0003-1099-3571

⁸Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-
Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

hakkisoy@erbakan.edu.tr

ORCID ID: 0000-0003-3938-0381

⁹Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği,
Kayseri, Türkiye

bahdem@erciyes.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-2650-1167

¹⁰Mardin Artuklu Üniversitesi, OSB Meslek Yüksek Okulu, Makine
Bölümü, Mardin, Türkiye

umranatay@artuklu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

¹¹Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Makine
Bölümü, Mardin-Türkiye

ayanoglu@artuklu.edu.tr

ORCID ID: 0009-0001-2392-7015

¹²Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek
Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Bilgisayar
Programcılığı Programı, Tekirdağ, Türkiye

ekahya@nku.edu.tr

ORCID ID: 0000-0001-7768-9190

¹³Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Tarımsal
Mekanizasyon ve Bilişim Teknolojileri, Erzurum-Türkiye

zgozubuyuk2001@yahoo.com.tr

¹⁴Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği,
Kayseri, Türkiye

mertyaz@erciyes.edu.tr

ORCID ID: 0009-0003-3367-6656

¹⁵Harran Üniversitesi Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO Elektronik ve
Otomasyon Bölümü, Eyyübiye, Şanlıurfa, Türkiye
mgerger@harran.edu.tr
ORCID ID: 0000-0003-4572-5630

¹⁶Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve
Teknolojileri Mühendisliği Fakültesi, 07070, Antalya, Türkiye
alperbayrm@hotmail.com

¹⁷DSİ 8. Bölge Müdürlüğü, Arazi Toplulaştırma ve TİGH Şubesi,
Erzurum-Türkiye
mesutcemal@yahoo.com

¹⁸Demsay Elektronik, Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye
o.yavuz@demsay.com,
ORCID ID: 0009-0009-2489-1147

¹⁹Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü
Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

²⁰GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Haliliye, Şanlıurfa,
Türkiye

²¹GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Haliliye, Şanlıurfa,
Türkiye

²²GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Haliliye, Şanlıurfa,
Türkiye

²³GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Haliliye, Şanlıurfa,
Türkiye

²⁴GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Haliliye, Şanlıurfa,
Türkiye

²⁵Toprak, Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü
Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

²⁶Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği,
Kayseri, Türkiye
4013930081@erciyes.edu.tr

²⁷İstanbul Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
borandan54@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17879750>



Copyright © 2025 by UBAK publishing house

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by

any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law. UBAK International Academy of Sciences Association Publishing House®

(The Licence Number of Pubicator: 2018/42945)

E mail: ubakyayinevi@gmail.com

www.ubakyayinevi.org

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

UBAK Publishing House – 2025©

ISBN: 978-625-5753-33-5

December / 2025

Ankara / Turkey

ÖNSÖZ

Tarımda Teknoloji ve Enerji Yönetimi” başlığını taşıyan bu eser, modern tarımsal üretimin temel dinamikleri arasında yer alan teknolojik yenilikler ile enerji verimliliğini bütüncül ve analitik bir bilimsel perspektiften incelemektedir. Günümüz tarımında sürdürülebilirliği sağlamak; yalnızca üretim tekniklerini iyileştirmekle değil, aynı zamanda enerji kullanımını optimize etmek, çevresel etkileri azaltmak ve teknolojiyi üretimin her aşamasına etkin biçimde entegre etmekle mümkündür. Bu kitap, söz konusu dönüşümün bilimsel altyapısını ortaya koyan nitelikli çalışmaları bir araya getirmektedir.

Kitapta yer alan bildiriler, badem hasadında farklı dönemlerin ürün kalitesi üzerindeki etkilerinden kök bölgesinde sıcaklık takibinin köklenme sürecine katkısına ve biber tohumlarının çimlenme koşullarının belirlenmesine kadar geniş bir yelpazede somut veriler sunmaktadır. Bu çalışmalar, tarımsal mekanizasyon ve enerji yönetiminde yenilikçi yöntemlerin uygulanabilirliğini ortaya koyarak hem üretim süreçlerine hem de bilimsel literatüre anlamlı katkılar sağlamaktadır.

Hasat dönemlerinin fizyolojik ve mekanik parametrelerle değerlendirilmesi, kök bölgesine ait sıcaklık eşiklerinin tanımlanması ve çimlenme sürecinin optimum koşullarının belirlenmesi; gelecekteki araştırmalara rehberlik edecek nitelikte bilimsel bulgular içermektedir.

Bu eser, akademik açıdan değerli bir derleme olmasının yanı sıra; üreticiler, araştırmacılar, öğrenciler ve sektör paydaşları için de pratik

bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır. Tarımda teknoloji ve enerji yönetimi odaklı elde edilen sonuçlar, bölgesel uygulamaların evrensel bilimsel standartlarla bütünleştirilmesine hizmet etmektedir.

Bu kitabın hazırlanmasına katkı sunan tüm araştırmacılara ve destek veren kurumlara teşekkür eder; *Tarımda Teknoloji ve Enerji Yönetimi* alanında yeni çalışmaların önünü açmasını temenni ederiz.

12.12.2025

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Mehmet Fırat BARAN

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....8

İÇİNDEKİLER.....10

BÖLÜM 1:

GERÇEK ZAMANLI BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE DOLMALIK
BİBERLERİN AĞIRLIK VE UZUNLUK DEĞERLERİNİN TAHMİN
EDİLMESİ.....14-41

Erhan KAHYA

BÖLÜM 2:

TARIM 4.0 İÇİN TARIMSAL KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI:
TARKONSİS42-52

Onur İlyas YAVUZ

Hakkı SOY

BÖLÜM 3:

TARIMSAL ATIKLARDAN BİYOGAZ ÜRETİMİNDE SORUNLAR
VE ÖNERİLER.....53-73

Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Ümran ATAY

BÖLÜM 4:

SİLAJLIK MISIR SU VERİM İLİŞKİLERİ İLE TOPRAK FİZİKSEL
VE HİDROLİK ÖZELLİKLERİNİN FARKLI TORAK İŞLEME
YÖNTEMLERİNE GÖRE DEĞİŞİMLERİ.....74-121

Mustafa Cemal ADIGÜZEL

Üstün ŞAHİN

Zinnur GÖZÜBÜYÜK

BÖLÜM 5:

MOBİL UYGULAMALAR ve TARIMSAL AMAÇLI KULLANIMI
.....122-143

Alper BAYRAM

Murad ÇANAKCI

BÖLÜM 6:

II. ÜRÜN MISIR YETİŞTİRİCİLİĞİNDE YAPRAK SICAKLIĞI
ESASLI OTOMATİK SULAMA SİSTEMİNİN VERİM VE SU
KULLANIM ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ
.....144-160

Akın ÜN

Ertan KAPLAN

Yusuf İslam KALKAN

Abdulkadir BAL

Ahmet Bedei EMEN

Mustafa GERGER

Abdullah Suat NACAR

Ahmet Tahsin ÖZTAŞ

Eyüp Selim KÖKSAL

BÖLÜM 7:

ISITMA MERKEZİNİN ATIK ISININ ORGANİK RANKİNE
ÇEVİRİMİ KULLANILARAK TERMODİNAMİK ANALİZİ:
MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ SERA ÖRNEĞİ.....161-174

Abdulkadir AYANOĞLU

Ümran ATAY

BÖLÜM 8:

MARDİN İLİNDE BİYOGAZ ÜRETİM POTANSİYELİ VE
ÇEVRESEL ETKİLERİ.....175-191

Cengiz KARACA

BÖLÜM 9:

TARIMSAL ATIKLARDAN BİYOKÜTLE PELET ÜRETİMİNDE
GÜNCEL DURUM VE TEKNOLOJİK EĞİLİMLER.....192-218

Osman Mert YAZ

Bahadır DEMİREL

Fatih KESKİNKILIÇ

Gürkan Alp Kağan GÜRDİL

BÖLÜM 10:

ÇELTİK TARIMINDA DRONE VE MAKİNE İLE EKİM
OLANAKLARININ BİTKİNİN BAZI ÖZELLİKLERİNİ ÜZERİNE
ETKİSİ219-244

Nihat Bora ATMACA

Yılmaz BAYHAN

BÖLÜM 1

GERÇEK ZAMANLI BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE DOLMALIK BİBERLERİN AĞIRLIK VE UZUNLUK DEĞERLERİNİN TAHMİN EDİLMESİ*

Dr. Erhan KAHYA

GİRİŞ

Tarım sektöründe ürünlerin hızlı, doğru ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesi, verimliliğin artırılması ve kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle sebze üretiminde ürün boyutlarının ve ağırlıklarının doğru tahmini, hem pazarlama hem de hasat planlaması açısından kritik bir parametredir. Dolmalık biberler, dünya genelinde yaygın olarak yetiştirilen ve ticari değeri yüksek sebzelerden biridir. Geleneksel yöntemlerle ürün ağırlık ve uzunluklarının belirlenmesi genellikle manuel ölçüm gerektirmektedir. Bu nedenden dolayı zaman kaybına, iş gücü maliyetine ve insan kaynaklı hatalara yol açmaktadır.

Son yıllarda bilgisayarla görme ve yapay zeka tabanlı yaklaşımlar, tarımsal üretimde önemli bir dönüşüm sağlamıştır. Görüntü işleme teknikleri, ürünlerin fiziksel özelliklerini temassız bir şekilde ölçme imkânı sunmaktadır. Böylece hem zamandan tasarruf sağlanmakta hem de yüksek doğruluk elde edilmektedir. Literatürde çeşitli meyve ve sebzelerin boyut ve ağırlık tahminine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı yalnızca laboratuvar

*Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.

ortamında veya sınırlı veri setleriyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mevcut sistemlerin çoğunda gerçek zamanlı tahmin kapasitesi sınırlı kalmakta ve tarımsal uygulamalara doğrudan entegrasyon zorlaşmaktadır.

Tarımda ürün boyutlarının ve kütesinin temassız ve hızlı biçimde tahmin edilmesi; hasat planlaması, sınıflandırma/kalite kontrol ve tedarik zinciri verimliliği açısından kritik bir gereksinimdir. Son yıllarda bilgisayarla görme ve derin öğrenme, meyve-sebze boyutlandırma ve sayım sorunlarına sahada uygulanabilir sunmaktadır. RGB, stereo ve RGB-D tabanlı yaklaşımların gerçek koşullarda meyve tespiti/sayımı ile boyut kestirimi için başarıyla kullanılmaktadır. Aydınlatma değişimleri ve örtüşmeler gibi zorluğuna rağmen sahada gerçek zamanlı çalışmanın mümkün hale geldiğini göstermektedir (Miranda ve ark.,2023). Ağırlık (kütle) kestirimi özelinde çalışmalar, iki ana hatta ilerlemektedir. Bunlar sırasıyla 2B görüntü tabanlı öğrenme ile piksel/alan benzeri özniteliklerden regresyonla ağırlık tahmini ve derinlik bilgisi içeren sensörlerle geometriden hacim/kütleye giden kestirimdir. Yapılan çalışmada çilekte yalnızca görüntüden (piksel sayısı) hareketle geliştirilen basit doğrusal ve SVR modelleri %89–96 aralığında açıklama gücüne ulaşarak, yıkımsız ve düşük maliyetli ağırlık tahmininin uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Basak ve ark.,2022). Benzer biçimde stereo/RGB-D yaklaşımlar; biber, domates ve patlıcan gibi sebzelerde uzunluk/çap ölçümü ve hacim temelli kütle kestirimi için etkili bir yol sunduğunu rapor etmektedir (Zheng ve ar.,2022). Dolmalık biber (*Capsicum annuum* L.) için son çalışmalar, hat içi (in-line) sınıflandırma/sıralama ve

fenotiplleme görevlerinde derin öğrenmenin endüstriyel hızlarda başarıyla kullanılabildiğini göstermiştir. Derin evrimsel ağlarla geliştirilen bir sistem, olgunluk ve boyuta göre hat üzerinde 3000 adet/saat kapasite ve 4 ms örnek başına işlem süresiyle gerçek zamanlı performans bildirmiştir (Modi-Alden ve ark.,2021). Ayrıca, hasat sonrası saha koşullarında biber örneklerinin anlık ayrık örnek (instance) segmentasyonu üzerine yapılan çalışmalar, klasik yöntemlere kıyasla mAP değerlerinde belirgin artışlar elde ederek, sayma/ölçüm gibi türetilmiş görevlerin doğruluğunu da yükseltmektedir (Gómez-Zamanillo ve ark.,2024). Çeşit tanıma tarafında ise YOLOv8 ailesi, gerçek zamanlı uygulamalara uygun doğruluk/hız dengesiyle Capsicum türlerinde pratik çıktılar sunmaktadır(Barbosa ve ark.,2025). Bununla birlikte, biberlerde aynı yazılım içinde ve gerçek zamanlı olarak hem ağırlık hem de uzunluk değerlerinin RGB tabanlı görüntülerden birlikte tahmin edilmesine yönelik uygulamalar sınırlıdır. Ağırlık için çalışmaların bir bölümü RGB-D derinlik sensörleri ile örnek (sweet pepper) üzerinde meyve kütlesi tahmin edilmesidir. Derinlik bilgisinin avantajını doğrulamakla birlikte, donanım maliyeti ve entegrasyon karmaşıklığı nedeniyle her üretim hattına doğrudan uyarlanabilir (Mousavi ve Prasath ,2019). Diğer taraftan düşük maliyetli görüntüleme ile tek geçişte (single-pass) boyut ve kütle tahminini birleştiren, gerçek zamanlı yazılım çözümlerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır (Miranda ve ark.,2023). Dolmalık biber ve diğer biber türleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Moon ve ark. (2020) sera ortamında CNN tabanlı regresyonla taze ağırlık tahmininde $R^2 \approx 0.95$ değerine ulaşırken, Lee ve Son (2019) soilless kültürde yük hücresi

ve nem sensörü ile gerçek zamanlı ve yıkımsız ölçüm yaparak R^2 0.97–0.98 gibi yüksek bir doğruluk elde etmiştir. Halstead ve ark.. (2018) Faster R-CNN tabanlı robotik görüş sistemiyle biber adedi ve kalite tahmininde %4.1 hata ve $F1 \approx 77.3$ değerleriyle gerçek zamanlıya yakın bir performans göstermiştir. Sosa-Herrera ve ark. (2022) ise UAV ile elde edilen RGB görüntüler ve Mask R-CNN modeliyle bitki sağlığını %94.5 doğrulukla sınıflandırmıştır. Son yıllardaki çalışmalarda gerçek zamanlı tespit için derin öğrenme modelleri öne çıkmış; Ma ve ark.(2025) YOLOv8-CBSE modeliyle olgunluk tespitinde mAP %88.08 ve $F1 \approx 81.69$ elde etmişlerdir. Han ve ark. (2025) DSW-YOLO yaklaşımıyla zorlu çevre koşullarında yeşil biber tespitinde hem doğruluğu artırmış hem de inference süresini 0.7 ms kısaltmışlardır. Abubeker ve ark.(2024) YOLOv5 tabanlı sistemle bird's eye chili sınıflandırmasını gerçek zamanlı gerçekleştirmiştir. Fatchurrahman ve ark. (2025) yeşil dolmalık biberin raf ömrü boyunca tazeliğini RGB görüntüleme ve makine öğrenmesi ile izlemeye yönelik bir yaklaşım geliştirmişler, ağırlık kaybı ve doku değişimlerini analiz etmişlerdir.

Yapılan çalışmanın amacı, dolmalık biberlerin ağırlık ve uzunluk değerlerini bilgisayar tabanlı gerçek zamanlı bir yazılım aracılığıyla yüksek doğrulukla tahmin etmektir. Geleneksel manuel yöntemlerin yol açtığı zaman kaybı, iş gücü maliyeti ve ölçüm hatalarını ortadan kaldırmaktır. Çalışma, yalnızca hızlı ve güvenilir bir ölçüm alternatifi geliştirmekle kalmayıp, aynı zamanda üreticilerin hasat planlamasını kolaylaştıracaktır. Kalite kontrol süreçlerini iyileştirecek ve ürünlerin pazar değerinin daha doğru belirlenmesine katkı sağlayacak bir yaklaşım sunmaktadır. Önceki çalışmaların aksine sınırlı sayıda

bulunan, aynı yazılım aracılığıyla hem ağırlık hem de uzunluk değerlerini gerçek zamanlı tahmin edebilen sistemdir. Tarımsal üretimde dijitalleşmenin önemli bir adımı olacağı düşünülmektedir. Gelecekte otomatik sınıflandırma, paketleme ve endüstriyel kalite kontrol uygulamalarına doğrudan entegre edilebilecek güçlü bir çözüm ortaya konmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Dolmalık Biber

Dolmalık biber (*Capsicum annuum* L.), Solanaceae familyasına ait önemli bir sebze türüdür .Taze tüketim ve endüstriyel kullanım açısından yüksek ekonomik değere sahiptir. Büyüme sürecinde sıcaklık, ışık ve sulama koşullarına oldukça duyarlı olan dolmalık biber, genellikle sera ve açık tarla koşullarında yetiştirilmektedir. Hasat kriterleri açısından meyve rengi, büyüklüğü ve parlaklığı temel göstergelerdir. Ticari amaçlı üretimde genellikle meyveler tam fizyolojik olgunluktan önce, yeşil renkte ancak tam büyüklüğüne ulaşmışken hasat edilir. Olgunlaştıkça kırmızı, sarı veya turuncu renge dönen biberler, sofralık tüketim veya endüstriyel işleme için farklı dönemlerde toplanabilmektedir. Hasatta dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar, meyvenin düzgün formda, çatlak veya deformasyonsuz olması, parlak ve canlı renkte bulunmasıdır. Pazarlama standartlarına göre meyve eti kalınlığı, homojenlik ve raf ömrü de önemli kalite kriterleri arasında sayılmaktadır. Bu yönüyle dolmalık biber, tarımsal üretimde yüksek katma değer sağlamaktadır. Verim ve kalite odaklı çalışmalarla araştırmalarda sıklıkla ele alınan bir türdür.

Python Programlama Dili

Çalışmada kullanılan yazılım dili Python olup, özellikle görüntü işleme ve bilimsel hesaplamalar için geniş kütüphane desteği nedeniyle tercih edilmiştir. Python, açık kaynaklı ve platform bağımsız bir dildir. Kolay öğrenilebilir sözdizimi, güçlü bilimsel hesaplama kütüphaneleri (NumPy, Pandas, SciPy) ve gelişmiş görüntü işleme araçlarına (OpenCV, scikit-image) sahiptir. Son yıllarda tarımda otomasyon ve bilgisayarla görme uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Python'un en önemli avantajlarından biri, farklı alanlara özgü geniş kütüphane ekosistemidir. Bu çalışmada özellikle OpenCV kütüphanesi görüntü işleme, nesne işaretleme ve mesafe ölçümü için; NumPy ise matematiksel işlemler ve piksel tabanlı hesaplamalar için kullanılmıştır. OpenCV, gerçek zamanlı görüntü işleme performansı ile tarımsal üretim ve kalite kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Shihavuddin ve ark., 2019).

Son yıllarda yapılan birçok çalışmada Python dili, tarım ürünlerinin sınıflandırılması, ağırlık tahmini ve nesne tespiti gibi uygulamalarda başarıyla kullanılmıştır. Benzer şekilde, Afonso ve ark. (2020) Python ile geliştirilen derin öğrenme tabanlı sistemlerle sera ortamında domates tespiti gerçekleştirmiştir. Bu nedenle Python dili, hem araştırma prototiplerinin geliştirilmesinde hem de endüstriyel uygulamalara uyarlanabilirliği açısından güçlü bir yazılım aracıdır.

Yazılım / Kütüphane	Kullanım Amacı
Python 3.10+	Genel programlama ve deneysel altyapı
OpenCV (cv2)	Görüntü işleme, canlı kamera akışı, mesafe ölçümü
NumPy	Matematiksel hesaplamalar, piksel mesafesi analizi
Matplotlib	Grafikler ve görselleştirme (isteğe bağlı)

Çalışma, standart bir kişisel bilgisayar ve USB tabanlı bir kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar donanımı, Python tabanlı yazılımın çalıştırılması için yeterli işlem gücüne ve bellek kapasitesine sahiptir. Kamera ise nesne boyutlarının ölçümü için gerekli görsel verileri sağlamaktadır.

Donanım Bileşeni	Özellikler
Bilgisayar	Intel Core i7/13. nesil işlemci, 32 GB RAM, Windows 10 işletim sistemi
Kamera	Harici USB kamera, 720p çözünürlük
Depolama	1.4 TB.

Yöntem

Çalışmada kullanılan dolmalık biber örnekleri (*Capsicum annuum* L.), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda yer alan ısı kontrollü sera ortamında yetiştirilmiştir. Ölçümlerde 8–10 cm uzunlukta, ticari pazarlama standardındaki yeşil renkli ve fiziksel deformasyonu bulunmayan örnekler kullanılmıştır.

Dolmalık biberlerin ağırlık ve uzunluk değerlerini gerçek zamanlı olarak tahmin eden bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir.

1. Görüntü Toplama: Kamera aracılığıyla nesnenin canlı görüntüsü alınmıştır.

2. Nokta Seçimi: Kullanıcı, nesnenin iki ucuna fare ile tıklayarak ölçüm yapılacak noktaları seçmiştir. Bu işlem, OpenCV'nin setMouseCallback() fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

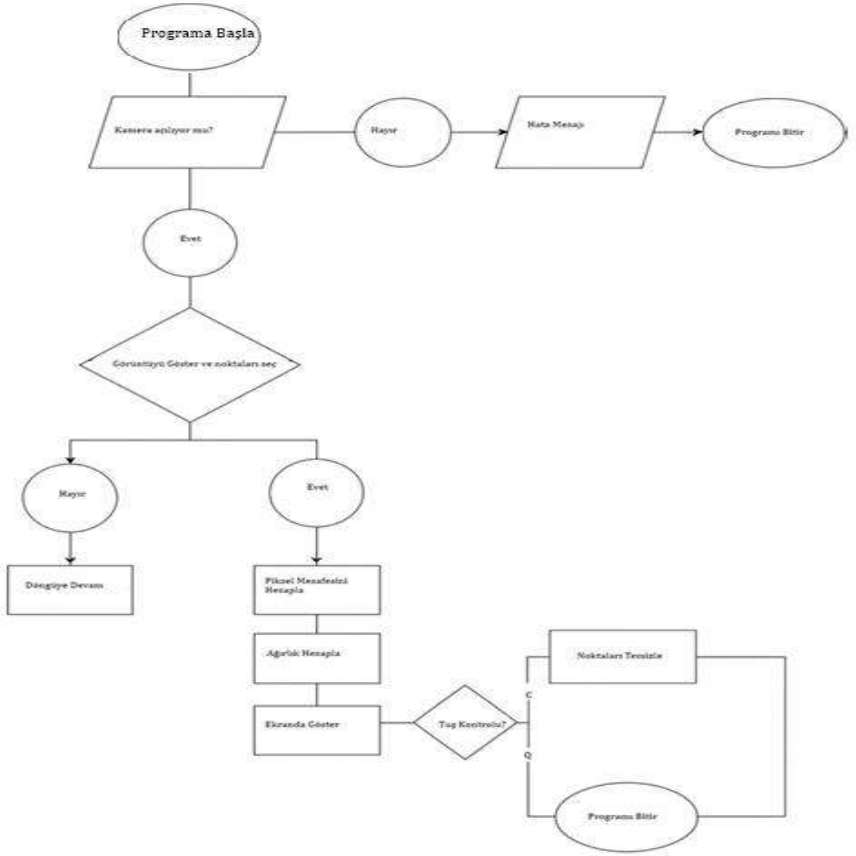
3. Mesafe Hesaplama: Seçilen iki nokta arasındaki piksel mesafesi Öklidyen mesafe formülüyle hesaplanmış, ardından kalibrasyon katsayısı (PIXELS_PER_CM) kullanılarak santimetreye dönüştürülmüştür.

4. Ağırlık Tahmini: Uzunluk verisine dayalı olarak basit bir regresyon modeli tanımlanmış, böylece ağırlık gram (gr) ve kilogram (kg) cinsinden tahmin edilmiştir.

5. Kullanıcı Etkileşimi: Ölçüm sırasında kullanıcı, klavye kısayolları ile noktaları temizleyebilmiş (C), kalibrasyonu sıfırlayabilmiş (R) veya programdan çıkabilmiştir (Q).

6. Çıktıların Sunumu: Elde edilen uzunluk ve ağırlık değerleri gerçek zamanlı olarak görüntü üzerine yazdırılmıştır.

Yöntemsel adımlar Şekil 1'te verilen akış diyagramı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Program akış diyagramı

Çalışmada kurulan sistem, kamera aracılığıyla alınan görüntüler üzerinden çalışmaktadır. Program başlatıldığında ilk olarak kameranın aktif olup olmadığı kontrol edilmektedir. Kamera açılmadığı durumda hata mesajı verilerek program sonlandırılmaktadır. Kamera aktif ise, kullanıcıya canlı görüntü aktarılmaktadır. Ölçüm yapılacak nesnenin (dolmalık biberin) uç noktaları fare tıklamaları ile seçilmektedir.

Kullanıcı, ölçüm yapmak istediği biberin iki ucuna tıklayarak noktaları belirlemektedir. Bu işlem için `cv2.setMouseCallback()`

fonksiyonu ile fare tıklamaları yakalanmış ve koordinatlar kaydedilmiştir. Seçilen noktalar ekranda işaretlenerek kullanıcıya görsel geri bildirim sağlanmıştır.

Uzunluk Hesaplaması

Seçilen iki nokta arasındaki piksel mesefası Öklidyen uzaklık formülü ile hesaplanmıştır.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

Elde edilen mesafe,daha önce belirlenmiş olan sabit dönüşüm katsayısı(1 cm=40 piksel) kullanılarak santimetre cinsine dönüştürülmüştür. Böylece biberin uzunluk değeri elde edilmiştir.

Ağırlık Tahmini

Uzunluk bilgisi kullanılarak, dolmalık biberin ağırlığı tahmin edilmiştir. Bunun için uzunluk-ağırlık ilişkisine dayalı olarak geliştirilen bir matematiksel model kullanılmıştır. Program çıktısı hem gram hem de kilogram cinsinden ekrana yansıtılmıştır.

Kullanıcı Etkileşimi ve Kontroller

Program çalışması sırasında kullanıcıya iki seçenek sunulmuştur:

- C tuşu: Seçilen noktaları temizleyerek yeni ölçüme başlanmasını sağlar.
- Q tuşu: Programı sonlandırır.

Her ölçüm sonucunda biberin tahmini uzunluk ve ağırlığı ekranda anlık olarak gösterilmiştir.

Aşağıda yazılmış olan kodlar gösterilmiş ve açıklanmıştır.

Yazılan sistem kod parçaları ve açıklamaları aşağıda belirtilmiştir.

1. Program Parçası (mouse_callback fonksiyonu)

```
# Sabit dönüşüm oranı (örnek: 1 cm = 40 piksel)
PIXELS_PER_CM = 40.0

def mouse_callback(event, x, y, flags, param):
    "Fare tıklamalarını yakalamak için geri çağırım fonksiyonu."
    global points
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        print(f"Nokta eklendi: ({x}, {y})")
        points.append((x, y))
```

-
- PIXELS_PER_CM: Pikselden cm'ye dönüşüm oranını belirlenmektedir. (kameradan 40 piksel = 1 cm).
 - mouse_callback: Fare ile görüntü üzerinde tıklanan noktaları yakalayan fonksiyondur.
 - Mouse sol tıklama yapıldığında (EVENT_LBUTTONDOWN) tıklanan koordinatlar (x, y) ekrana yazdırılır ve points listesine eklenmektedir

1 nolu bölüm, ölçüm yapılacak noktaları seçmemizi sağlamaktadır.

2. Program Parçası (main fonksiyonunun başlangıcı)

```
def main():
    global points
    cap = cv2.VideoCapture(0)
    if not cap.isOpened():
        print("Kamera açılmadı!")
        return
    cv2.namedWindow("Nesne Boyutu ve Ağırlık Ölçümü")
    cv2.setMouseCallback("Nesne Boyutu ve Ağırlık Ölçümü",
        mouse_callback)
```

```

print("Program başlatıldı!")
print("Ölçmek istediğiniz nesnenin iki ucuna tıklayın.")
print("C: Temizle, Q: Cikis")
while True:
    ret, frame = cap.read()
    if not ret:
        print("Kamera görüntüsü alınamıyor!")
        break
    # Seçilen noktaları çiz
    for point in points:
        cv2.circle(frame, point, 5, (0, 255, 255), -1)

```

-
- cv2.VideoCapture(0) → Kamerayı başlatmaktadır.
 - Kamera açılmazsa hata mesajı vermektedir.
 - cv2.namedWindow → Görüntünün gösterileceği pencere oluşturmaktadır.
 - cv2.setMouseCallback → Fare ile noktaları seçmek için mouse_callback fonksiyonunu pencereye bağlamaktadır.
 - Döngü başlar → kameradan sürekli görüntü alınmaktadır. (frame olarak)
 - Kullanıcı seçtiği her nokta sarı daire ile işaretlenmektedir.

2 nolu bölüm, kameradan canlı görüntü alma ve seçilen noktaları işaretleme işini yapmaktadır.

3. Program Parçası (Ölçüm Hesaplamaları)

```

# İki nokta seçildiyse ölçüm yap
if len(points) == 2:
    cv2.line(frame, points[0], points[1], (255, 0, 255), 2)

```

```

pixel_distance = np.sqrt((points[1][0] - points[0][0])**2
+ (points[1][1] - points[0][1])**2)
length_cm = pixel_distance / PIXELS_PER_CM
weight_g, weight_kg = calculate_weight(length_cm)
text1 = f"Uzunluk: {length_cm:.1f} cm"
text2 = f"Agirlik: {weight_g:.1f} g ({weight_kg:.3f} kg)"
y_offset = 80
cv2.putText(frame, text1, (10, y_offset),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0, 255, 0), 2)
cv2.putText(frame, text2, (10, y_offset + 40),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0, 255, 255), 2)

```

Eğer 2 nokta seçilmişse:

- Bu noktaların arasına mor bir çizgi çizilmektedir.
- İki nokta arasındaki piksel mesafesi Öklid formülü ile hesaplanmaktadır.
- Piksel mesafesi PIXELS_PER_CM'ye bölünerek cm cinsinden uzunluk bulunmaktadır.
- calculate_weight(length_cm) fonksiyonu ile nesnenin ağırlığı (gram ve kilogram) tahmin edilmektedir.
- Uzunluk ve ağırlık bilgileri görüntünün üstüne yazdırılmaktadır.

3 nolu bölüm, seçilen noktalar arasındaki mesafeyi ölçer ve tahmini ağırlığı hesaplanmaktadır.

4. Program Parçası (Klavye Kontrolleri ve Kapanış)

```

cv2.putText(frame, "C: Temizle, Q: Cikis", (10,
frame.shape[0] - 20),

```

```

cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (255, 255,
255), 2)

cv2.imshow("Nesne Boyutu ve Ağırlık Ölçümü", frame)
key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
if key == ord('q'):
    break
elif key == ord('c'):
    points = []
    print("Noktalar temizlendi.")
cap.release()
cv2.destroyAllWindows()
if __name__ == "__main__":
    main()

```

- Görüntü üzerinde "C: Temizle, Q: Çıkış" yazısı gösterilir.

- Kullanıcı:

Q → Programdan çıkmaktadır.

C → Seçilen noktaları sıfırlamaktadır (temizler).

- Döngüden çıkıldığında:

cap.release() → Kamera serbest bırakılmaktadır.

cv2.destroyAllWindows() → Açık olan tüm pencereler kapatılmaktadır.

- main() çalıştırılarak program başlatılır.

4 nolu bölüm, klavye kontrolleri ve programın sonlandırılması işini yapmaktadır.

Program çalıştırıldığında seçim ve tahmin ekranların a ait örnek görüntüler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Ağırlık ve uzunluk tahmin ekranı.

Tablo 1’de bilgisayar ile ölçülen değerler ve elle yapılan ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 1.Deneme sonuç tablosu

Adet	Bilgisayar ölçümleri		Gerçek değerler		Ağırlık farkı(gr.)	Uzunluk farkı(cm)
	Uzunluk(cm)	Ağırlık(gr.)	Uzunluk(cm)	Ağırlık(gr.)		
1	8	76	8	76,9	-0,90	0
2	8,1	78,5	7,7	78,9	-0,40	0,4
3	7,9	74,3	7,5	73,1	1,20	0,4
4	8	75,4	7,9	75,5	-0,10	0,1
5	8,3	86,6	8	82,6	4,00	0,3
6	8,2	82,7	7	79,9	2,80	1,2
7	7,8	70,7	7,3	68,9	1,80	0,5
8	8	77,5	7,5	77,4	0,10	0,5
9	7,7	69,3	7,4	66,9	2,40	0,3
10	8	76	7,7	76,9	-0,90	0,3
11	7,8	72,4	7,3	69,7	2,70	0,5
12	8	77,4	7,6	77,3	0,10	0,4
13	7,5	64,1	7,3	61,6	2,50	0,2
14	8,5	90,8	8,2	86,3	4,50	0,3
15	8,1	79,3	8	79,4	-0,10	0,1

Bulunan değerler korelasyon analizi ,t-Testi, scatter plot ve hata metrik analizi yapılmıştır. Hata metrik analizleri Mean Absolute Error(MAE),RMSE (Root Mean Squared Error) ve MAPE (Mean Absolute Percentage Error) 'dir. Çalışmada kullanılan örnek sayısının 15 adet ile sınırlıdır. Sınırlandırma sebebi yöntem geliştirme ve sistem doğrulama amacıyla gerçekleştirilen n deneysel çalışma olmasından kaynaklanmaktadır. Bu kapsamda amaç, geniş veri tabanlı bir model oluşturmak yerine, geliştirilen yazılımın gerçek zamanlı ölçüm kapasitesini ve temel tahmin performansını test etmektir. Ayrıca 15 rnek üzerinde elde edilen sonuçlar yüksek korelasyon (ağırlık için $r = 0.964$), düşük hata metrikleri (MAPE = %2.18) ve $R^2 = 0.923$ değeri ile sistemin kavramsal olarak doğru çalıştığını göstermiştir. Bu durum, sınırlı örnek sayısına rağmen yöntemin yüksek doğruluk potansiyeline sahip olduğunu işaret etmektedir.

Analizler, verilerin birbirleriyle ilişkisini anlamak, grup farklarını değerlendirmek ve tahmin/ölçüm doğruluğunu nicel olarak ölçmek için yapılmıştır. Korelasyon analizi, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirleyerek hangi faktörlerin birlikte artıp azaldığını ve olası çoklu doğrusal bağlanım risklerini gösterir. İki sürekli değişken arasındaki ilişkinin yönünü (pozitif/negatif) ve biçimini (doğrusal mı yoksaNon-lineer mi) hızlıca gözlemlemek için scatter plot analizi yapılmıştır. t-Testi, iki grubun (rneğin deney-kontrol ya da iki yöntem/algoritma çıktısı) ortalamalarının istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklı olup olmadığını değerlendirir. Böylece gözlenen farkların rastlantısal mı yoksa sistematik mi olduğunu test etmektedir. Aynı lm yapan iki yöntem veya cihaz arasındaki farkların ne kadar tutarlı olduğunu görsel ve istatistiksel olarak

incelemek için Bland-Altman analizi yapılmıştır. Hata metrikleri ise model veya ölçüm performansını sayısal olarak özetlemektedir.

Analiz sonuçları;

1. Korelasyon Analizi

- **Uzunluk:** Bilgisayar ve gerçek ölçümler arasında orta düzeyde pozitif korelasyon var ($r = 0.596$, $p = 0.019$).
- **Ağırlık:** Bilgisayar ve gerçek ölçümler arasında çok yüksek korelasyon var ($r = 0.964$, $p < 0.001$).

2. Eşleştirilmiş t-Testi

- **Uzunluk:** İki ölçüm arasında istatistiksel olarak anlamlı fark var ($t = 5.13$, $p < 0.001$).
- **Ağırlık:** İki ölçüm arasında da anlamlı fark var ($t = 2.87$, $p = 0.012$).

3. Hata Metrikleri

- **Uzunluk değerleri için:**

MAE = 0.37 cm

RMSE = 0.45 cm

MAPE = %4.93

- **Ağırlık değerleri için:**

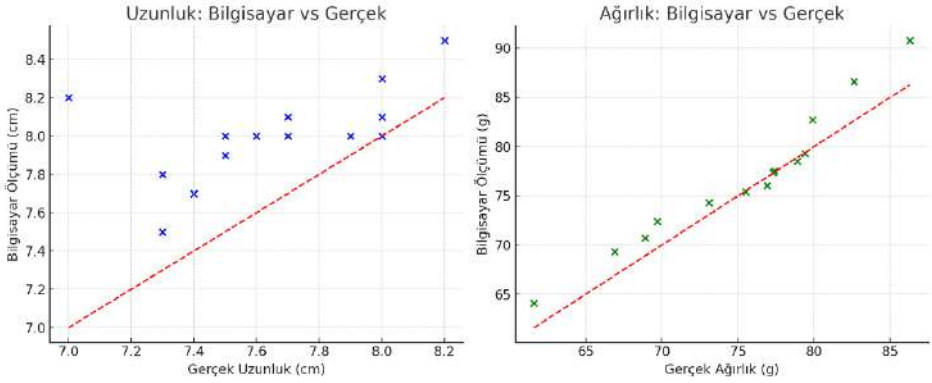
MAE = 1.63 gr

RMSE = 2.16 gr

MAPE = %2.18

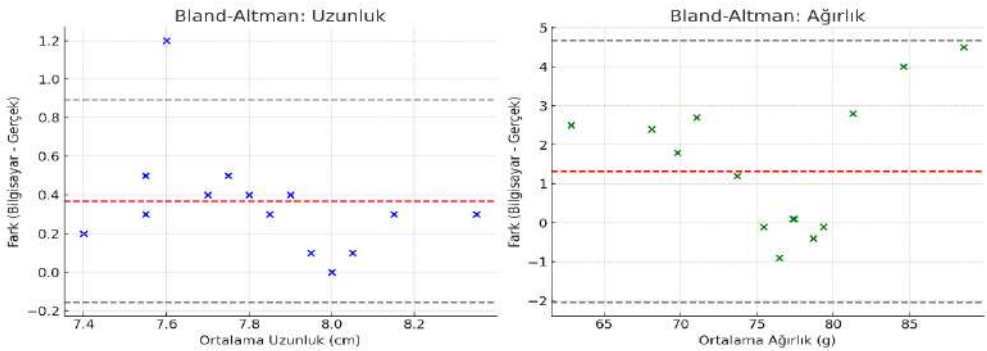
Bilgisayar ölçümleri, özellikle ağırlık tahmininde oldukça yüksek doğruluk göstermekte olup ($r \approx 0,96$ ve düşük hata değerleri) güvenilir sonuçlar üretmektedir. Uzunluk ölçümlerinde de kabul edilebilir düzeyde bir uyum bulunmasına rağmen ortalamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı

bir farklılık tespit edilmiştir. Bu nedenle uzunluk ölçümleri için daha fazla kalibrasyon yapılmasının gerekli olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.Scatter plot analiz ekranı

Şekil 3’deki değerlere göre bilgisayar ölçümleri ile gerçek değerlerin karşılaştırmalı scatter plot analizinde, uzunluk ölçümlerini gösteren soldaki grafikte noktaların kırmızı 45° çizgiden bir miktar uzaklaştığı görülmektedir. Bunun bilgisayar ölçümlerinin uzunlukta sistematik olarak farklılık gösterdiğini işaret etmektedir. Buna karşılık ağırlık ölçümlerini gösteren sağdaki grafikte noktaların kırmızı çizgiye oldukça yakın kümелendiği, dolayısıyla bilgisayarın ağırlık tahmininde yüksek doğruluk sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 4. Bland-Altman analiz ekranı

Şekil 4'deki değerlere göre Bland-Altman analizinde bilgisayar ölçümleri ile gerçek değerler arasında yüksek bir uyum bulunmaktadır. Uzunluk ölçümlerinde ortalama fark yaklaşık +0,37 cm olup bilgisayar ölçümlerinin sistematik olarak biraz daha yüksek değerler vermektedir. Ancak farkların büyük kısmının $\pm 1,96$ SD aralığında yer aldığı görülmektedir. Ağırlık ölçümlerinde ise ortalama fark yaklaşık +1,3 g olup bilgisayar ölçümleri gerçek değerlere göre az da olsa fazla tahmin yapmaktadır. Buna karşın farkların büyük çoğunluğu güven aralığı içerisinde kalmaktadır. Genel olarak bilgisayar ölçümleri hem uzunluk hem de ağırlıkta gerçek değerlere oldukça yakın sonuçlar üretmekte, özellikle ağırlık tahmininde çok güçlü bir uyum sergilemektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışmada geliştirilen sistem, bilgisayarla görme tabanlı gerçek zamanlı ölçüm yeteneği sayesinde daha önce yapılan araştırmalardaki benzer yaklaşımlardan ayrılmaktadır. Mevcut araştırmaların büyük bir kısmı, özellikle tarımsal ürünlerin boyut ve ağırlık tahmininde ya görüntü işleme tabanlı yöntemleri ya da derin öğrenme modellerini tercih etmiştir. Bu çalışmalar yüksek doğruluk oranları sunmalarına rağmen genellikle gerçek zamanlı uygulamalara uygun olmamış veya yüksek donanım gereksinimleri nedeniyle sahada kullanım açısından sınırlı kalmıştır. Geliştirilen sistem ise düşük maliyetli donanım üzerinde çalışabilmesi, kullanıcı etkileşimiyle desteklenen basit fakat etkili ölçüm mantığı ve gerçek zamanlı ölçüm olanağı ile bu eksiklikleri gidermektedir.

Sistemde ölçüm işlemi, kullanıcı tarafından mouse ile seçilen iki nokta arasındaki mesafenin hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşım hem ölçüm sürecini hızlandırmakta hem de farklı ürün türlerine

uyarlanabilirliği artırmaktadır. Tasarlanan algoritma herhangi bir eğitim sürecine gerek duymamakta olup yalnızca kalibrasyon işlemiyle farklı nesnelerde kullanılabilir. Cubero ve ark. (2011) ile Blasco ve ark. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında boyut-ağırlık ilişkisinin korelasyon analizleriyle modellenmesi önerilmiş olsa da, bu yöntemler çoğunlukla offline analiz süreçlerinde değerlendirilmiştir ve saha koşullarında gerçek zamanlı ölçüm için yeterli değildir. Bu bakımdan, önerilen yaklaşımın kamera üzerinden canlı görüntüde ölçüm gerçekleştirebilmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca sistemin kullanıcıya anlık geri bildirim verebilmesi, kalite kontrol ve tarımsal sınıflandırma gibi pratik uygulama alanlarında kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Derin öğrenme tabanlı yöntemler (Alfonso ve ark., 2020; Stein ve ark., 2016), elma ve domates gibi ürünlerde yüksek tahmin performansı sağlamış olsa da, bu modellerin yüksek işlem gücü gereksinimi bulunmaktadır. Bu nedenle düşük donanım kapasiteli sistemlerde kullanım için uygun değildir. Bu çalışmada sunulan yaklaşımın, düşük maliyetli donanımlarda dahi çalışabilir olması, sahaya yönelik pratik uygulamalarda önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Sistemin boyut ve ağırlık tahmin performansları arasındaki farklılıkların temel nedeni, ağırlık tahmininin doğrudan uzunluk ölçümüne dayalı regresyon modeli ile hesaplanmasıdır. Bu nedenle ağırlık tahminlerinde gözlenen yüksek korelasyon ($r \approx 0.96$), bilgisayara bağlı ölçüm hatalarının ağırlığa daha düşük oranda yansmasıyla ilişkilidir. Buna karşın uzunluk tahminindeki orta düzey korelasyon ($r \approx 0.60$), kameranin sahada konumlanması, perspektif etkileri, manuel nokta seçimi ve kalibrasyon

katsayısının sabit kabul edilmesi gibi faktörlere bağılı olarak ölçüme doğrudan yansıyan değişimlerden etkilenmiştir. Bu durum sistemin temel işlevselliğini olumsuz yönde etkilememekte olup, gelecekte dinamik kalibrasyon teknikleri ve otomatik uç nokta tespiti algoritmalarının entegrasyonu ile daha yüksek doğruluk elde edilmesi mümkündür.

Özgöl ağırlık parametresi bu çalışma kapsamına dahil edilmemiştir çünkü çalışmanın temel amacı, yüksek doğruluklu fiziksel ölçüm modelleri geliştirmekten ziyade, düşük maliyetli sistemler kullanılarak hızlı tahmin yapılabilirliğini göstermek üzerine odaklanmıştır. Bu tercih, uygulamaya yönelik gerçek zamanlı performansın ön planda tutulması açısından bilinçli yapılmıştır.

Çalışma klasik görüntü işleme tabanlı ancak çoğunlukla offline çalışan yaklaşımlar ile derin öğrenme tabanlı fakat yüksek donanım gerektiren sistemler arasında önemli bir köprü oluşturmaktadır. Gerçek zamanlı çalışma yeteneği, düşük maliyetli donanımlara uyumluluğu ve kullanıcı dostu etkileşim yapısı ile tarımsal üretim, kalite sınıflandırma ve lojistik süreçleri dahil olmak üzere geniş bir kullanım potansiyeli sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda otomatik uç nokta tespiti, adaptif kalibrasyon ve daha gelişmiş regresyon modellerinin entegrasyonu ile sistemin hem doğruluğunun hem de kullanım kolaylığının artırılacağı öngörülmektedir.

SONUÇ

Yapılan çalışmada, dolmalık biberlerin ağırlık ve uzunluk değerlerinin bilgisayar tabanlı gerçek zamanlı bir yazılım ile tahmin edilmesi amaçlanmış ve geliştirilen sistemin doğruluğu deneysel verilerle test edilmiştir. Bulgular, özellikle ağırlık tahmininde bilgisayar ölçümlerinin çok yüksek doğruluk sergilediğini ($r \approx 0,96$, düşük hata metrikleri) ortaya koymuştur. Uzunluk

ölçümlemlerinde de kabul edilebilir düzeyde bir uyum elde edilmiştir. Ancak istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunmuş ve bu durum daha fazla kalibrasyon gereksinimini göstermiştir. Scatter plot ve Bland-Altman analizleri, bilgisayar ölçümlerinin genel olarak gerçek değerlere yakın sonuçlar verdiğini, özellikle ağırlık tahmininde güçlü bir uyum sergilediğini doğrulamaktadır. Geliştirilen yazılım, düşük maliyetli donanımlarla çalışabilmesi sayesinde maliyet avantaj sunmaktadır. Ayrıca kullanıcı dostu bir etkileşim ve gerçek zamanlı ölçüm yapabilmesiyle literatürde yüksek donanım ihtiyacı gerektiren derin öğrenme tabanlı yöntemlere güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Bu yaklaşımın üreticilere hasat kriterlerinin takibi, kalite kontrol ve pazarlama süreçlerinde pratik bir araç sağlayacaktır. Aynı zamanda tarımsal dijitalleşmeye katkı sunarak gelecekte daha gelişmiş otomasyon çözümlerine zemin hazırlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışma erken aşama prototip geliştirme niteliğindedir. Gelecek araştırmalarda örnek sayısı artırılacak ve model çok değişkenli regresyon veya derin öğrenme temelli olarak yeniden yapılandırılacaktır.

KAYNAKLAR

- Abubeker, K. M., Abhijit, S. Akhil, V. K. Akshat Kumar, & Ben K. Jose. (2023). Computer Vision-Assisted Real-Time Bird Eye Chili Classification Using YOLO V5 Framework. *Journal of Artificial Intelligence and Technology*, 4(3), 265–271. <https://doi.org/10.37965/jait.2023.0251>
- Afonso, M., Fonteijn, H., Fiorentin, F. S., Lensink, D., Mooij, M., Faber, N., ... & Wehrens, R. (2020). Tomato fruit detection and counting in greenhouses using deep learning. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.571299>
- Barbosa, M. d. O., Aguiar, F. P. L., Sousa, S. d. S., Cordeiro, L. d. S., Nääs, I. d. A., & Okano, M. T. (2025). YOLOv8m for Automated Pepper Variety Identification: Improving Accuracy with Data Augmentation. *Applied Sciences*, 15(13), 7024. <https://doi.org/10.3390/app15137024>
- Basak, J. K., Paudel, B., Kim, N. E., Deb, N. C., Kaushalya Madhavi, B. G., & Kim, H. T. (2022). Non-destructive estimation of fruit weight of strawberry using machine learning models. *Agronomy*, 12(10), 2487. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102487>
- Blasco, J., Aleixos, N., & Moltó, E. (2003). Machine vision system for automatic quality grading of fruit. *Biosystems Engineering*, 85(4), 415–423. [https://doi.org/10.1016/s1537-5110\(03\)00088-6](https://doi.org/10.1016/s1537-5110(03)00088-6)
- Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., & Blasco, J. (2011). Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of

- fruits and vegetable. *Food Bioprocess Technol* (2011) 4:487–504.
<https://doi.org/10.1007/s11947-010-0411-8>
- Fatchurrahman, D.; Hilaili, M.; Russo, L.; Jahari, M.B.; Fathi-Najafabadi, A.(2025) Utilizing RGB imaging and machine learning forfreshness level determination of green bell pepper (*Capsicum annuum* L.) throughout its shelf-life. *Postharvest Biol. Technol.* 2025,222,113359.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113359>
- Gómez-Zamanillo, L., Galán, P., Bereciartúa-Pérez, A., Picón, A., Moreno, J. M., Berns, M., ... & Echazarra, J. (2024). Deep learning-based instance segmentation for improved pepper phenotyping. *Smart Agricultural Technology*, 9, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100555>
- Halstead M, McCool C, Denman S, Perez, T and Fookes, C.(2018).Fruitquantity and ripeness estimation using a robotic vision system.*IEEE robotics and automation Letters*, 3(4), 2995-3002.
<https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2849514>
- Han, Y., Ren, G., Zhang, J., Du, Y., Bao, G., Cheng, L., & Yan, H. (2025). DSW-YOLO-Based Green Pepper Detection Method Under Complex Environments. *Agronomy*, 15(4), 981.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15040981>
- Lee, J. W., & Son, J. E. (2019). Nondestructive and Continuous Fresh Weight Measurements of Bell Peppers Grown in Soilless Culture Systems. *Agronomy*, 9(10), 652.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9100652>
- Ma, Y., & Zhang, S. (2025). YOLOv8-CBSE: An Enhanced Computer Vision Model for Detecting the Maturity of Chili Pepper in the Natural Environment. *Agronomy*, 15(3), 537.

<https://doi.org/10.3390/agronomy15030537>

- Miranda, J. C., Gené-Mola, J., Zude-Sasse, M., Tsoulas, N., Escolà, A., Arnó, J., ... & Gregorio, E. (2023). Fruit sizing using ai: a review of methods and challenges. *Postharvest Biology and Technology*, 206, 112587. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112587>
- Mohi-Alden, K., Omid, M., Firouz, M. S., & Nasiri, A. (2021). Design and evaluation of an intelligent sorting system for bell pepper using deep convolutional neural networks. *Journal of Food Science*, 87(1), 289-301. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15995>
- Moon, T., Park, J., & Son, J. E. (2020). Estimation of sweet pepper crop fresh weight with convolutional neural network. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 29(4), 381-387. <https://doi.org/10.12791/ksbec.2020.29.4.381>
- Mousavi,S.M.H and VB Surya Prasath. (2019).On the feasibility of estimating fruits weights using depth sensors, *4 th International Congress of Developing Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, 2019*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33205.40162>
- Sosa-Herrera, J. A., Alvarez-Jarquín, N., Cid-García, N. M., López-Araujo, D. J., & Vallejo-Pérez, M. R. (2022). Automated Health Estimation of *Capsicum annuum* L. Crops by Means of Deep Learning and RGB Aerial Images. *Remote Sensing*, 14(19), 4943. <https://doi.org/10.3390/rs14194943>
- Stein, M., Bargoti, S., & Underwood, J. (2016). Image based mango fruit detection, localisation and yield estimation using multiple view geometry. *Sensors*, 16(11), 1915. <https://doi.org/10.3390/s16111915>

Zheng, B., Sun, G., Meng, Z., & Nan, R. (2022). Vegetable Size Measurement Based on Stereo Camera and Keypoints Detection. *Sensors*, 22(4), 1617. <https://doi.org/10.3390/s22041617>

BÖLÜM 2

TARIM 4.0 İÇİN TARIMSAL KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI: TARKONSİS¹

Onur İlyas YAVUZ*
Doç. Dr. Hakkı SOY

GİRİŞ

Tarımsal üretimde verimlilik ve kalite ihtiyacı; artan dünya nüfusu, iklim değişikliği, su ve toprak kaynaklarının azalması gibi çevresel ve sosyoekonomik faktörlerin etkisiyle günümüzde daha fazla önem kazanmıştır. Bu bağlamda sürdürülebilir tarım için yetersiz hale gelen geleneksel üretim teknikleri, yerini zamanla modern otomasyon sistemlerine bırakmaktadır. Tarım 4.0 olarak adlandırılan yeni dönemde; nesnelerin interneti (IoT), kablosuz haberleşme teknolojileri, bulut tabanlı veri depolama, yapay zekâ destekli veri analitiği ve karar destek mekanizmalarından faydalanılmasıyla önemli iyileştirmeler elde edilmesi mümkün hale gelmiştir (Wolfert vd., 2017; Villa-Henriksen vd., 2020). Tarımda süregiden bu dijital dönüşüm, başta verimlilik olmak üzere, doğal kaynakların verimli kullanımını, çevreye verilen zararın minimuma indirilmesini ve sürdürülebilirliği hedeflemektedir (FAO, 2022).

Tarım 4.0 uygulamalarında sulama, gübreleme, ilaçlama ve iklimlendirme gibi faaliyetlerinin otomatik olarak yönetilmesi kritik öneme sahiptir (Soy ve Dilay, 2021). Yetersiz sulama kuraklık stresine, aşırı sulama ise kök çürümesine ve hastalıklara sebep olur. Hassas sulama kontrolü yapılarak bitkinin ihtiyaç duyduğu optimal su miktarını karşılayarak büyümesine imkân sağlanır. Bununla birlikte bitkilerin sağlıklı gelişimi ve yüksek verim alınması için beslenme gereksinimi vardır. Doğru gübreleme ile bitki besin ihtiyacı dengeli

¹Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.

şekilde karşılanır. Gübre çiftçiler için önemli bir maliyet olup, gereğinden fazla gübre kullanımı maddi kayıplara ek olarak çevresel problemlere sebep olur. Sensör ölçümlerine dayalı gübreleme kontrolü ile doğru miktarda, doğru zamanda ve ihtiyaç olan alana gübre uygulaması yapılır (Raliya vd., 2023). İlaçlama kontrolü ile tarımsal üretimde büyük verim kayıplarına yol açabilen zarar veren böcekler, hastalıklar ve yabancı otların önüne geçilir. Buna karşın aşırı ilaç kullanımından kaynaklı kimyasal kalıntı sebebiyle insan sağlığı olumsuz etkilenirken, aynı zamanda toprağın, yer altı sularının ve havanın kirlenmesi durumu ortaya çıkar. Tehditlerin etkin biçimde kontrol altına alınması için ihtiyaç olacak dozda, zamanında ve hedefe yönelik ilaçlama mutlak bir ihtiyaçtır. Aşırı nem veya sıcaklık, hastalıklara sebep olabileceği gibi zararlıların çoğalması için elverişli ortam koşullarını yaratır. İklimlendirme kontrolü ile kapalı ve dikey tarım uygulamalarında sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörler dengede tutularak bitki için optimal büyüme koşulları oluşturulur (Zhang vd., 2025).

Geniş tarımsal alanlarda saha üzerinde farklı noktalarda fiziksel parametrelerin algılanması ve bitki ihtiyacına uygun koşulların sağlanmasına yönelik kontrollerin gerçekleştirilmesi önemli bir problemdir. Kontrol döngüsünün temelini oluşturan sensör-kontrolör ve kontrolör-eyleyici çiftleri arasında kablo ile veri transferi gerçekleştirilmesi uygulama gereksinimleri dikkate alındığında mümkün değildir. Pratikte uygulama yapılan sahanın büyüklüğüne bağlı olarak ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi ve LoRa yanında hücresel şebeke (2G, 3G, 4G) üzerinden veri aktarımı sağlanabilir (Soy, 2023). Bu çalışmada, Tarım 4.0 kapsamında geliştirilen, kablosuz sensör-eyleyici ağı modeline dayalı ve modüler yapıya sahip TARKONSİS (Tarımsal Kontrol Sistemi) uygulaması tanıtılmıştır. TARKONSİS sahada fiziksel büyüklükler hakkında veri toplayan, toplanan verileri bulut sunucu üzerinde analiz eden ve gerektiğinde saha üzerinde yerleştirilen eyleyicileri harekete geçiren bir kapalı döngü kontrol sistemidir. Demsay Elektronik Ar-Ge Merkezi tarafından yapılan Ar-Ge çalışmalarıyla geliştirilen bu sistem, kırsal alanlarda güvenilir veri iletimi ve düşük enerji tüketiminden kaynaklı uzun çalışma ömrüne sahiptir.

1. MATERYAL ve METOD

TARKONSİS, tarımsal üretim alanlarında çevresel parametrelerin izlenmesi ve kontrol edilmesine olanak sağlayan, modüler mimaride bir IoT tabanlı otomasyon çözümüdür. Sistem tarımsal üretim alanlarında çevresel parametrelerin uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesine imkân sağlayan dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar Sensör Modülü, Kablosuz Veri Aktarım Modülü, Kontrol Modülü, Yönetim ve İzleme Modülüdür.

1.1. Sensör Modülü

Sensör modülü; Şekil 1’de gösterildiği gibi sıcaklık ve nem sensörü, 3 eksenli ivmeölçer ve LoRa haberleşme birimi bulunmaktadır. ARM Cortex M0+ mimarili düşük enerji tüketimli modül, yüksek performans ile enerji verimliliğini bir araya getirerek tarım teknolojileri için ideal bir yapı sunar. Bu sayede hem çevresel koşulların hassas bir şekilde izlenmesini sağlar hem de kırsal alanlarda dahi uzun mesafeli kablosuz veri iletimi gerçekleştirir. Bu sensör modülü, toprak analizine yönelik harici sensörlerle (örneğin toprak pH, EC, azot, fosfor, potasyum sensörleri vb.) entegre edilebilir. Topraktaki besin elementleri ve kimyasal bileşenlerin ölçümü yapılabilir ve bu veriler sahada anında toplanarak sistemin karar mekanizmasına iletilebilir. RS485 arayüzü sayesinde bu sensörlerle güvenilir haberleşme kurulur. Modül üzerinde bulunan tek hücreli batarya şarj devresi, batarya durum izleme entegresi, SPI haberleşme hattı ve RS485 bağlantısı, sahada uzun süreli ve enerji verimli çalışmayı mümkün kılar. Batarya ile çalışan bu sistem, kablosuz yapısı sayesinde geniş tarım alanlarında altyapı ihtiyacı olmadan konumlandırılabilir. TARKONSİS sistemine entegre edilen bu sensör modülü, toprak parametrelerinin takibi, gübreleme optimizasyonu ve bitki gelişim süreçlerinin doğru yönetimi için kritik bir rol üstlenir. Böylece tarımsal üretimde hem verimlilik artırılır hem de kaynak kullanımı sürdürülebilir şekilde yönetilir.



Şekil 1. Sensör modülü donanımı.

1.2. Kablosuz Veri Aktarım Modülü

Kablosuz veri aktarım modülü, Şekil 2’de gösterildiği gibi sıcaklık-nem sensörü, 3 eksenli ivmeölçer ve ses sensörü, tarımsal alanlarda fiziksel koşulların izlenmesine olanak tanır. ARM Cortex M0+ mimarili düşük enerji tüketimli entegre devre mimarisiyle yüksek performansı ve enerji verimliliğini bir araya getirir. Kablosuz veri aktarım modülü donanım özellikleri bakımından modern tarım teknolojilerinin gerektirdiği güvenilirlik, hassasiyet ve uzun süreli saha kullanımı için idealdir. USB Type-C bağlantısı, kolay kurulum ve veri aktarımı imkânı sunarken; harici UART, kamera ve UFL anten bağlantıları ile sistemin işlevselliği kolayca genişletilebilir. Ayrıca modül, toprak sensörleri, zararlı algılama kameraları, hava kalitesi ölçüm birimleri gibi çeşitli harici sensörlerle entegre çalışabilir. Bu sayede tarımsal alanlarda toprağın durumu, çevresel ses analizi, sıcaklık ve nem değişimleri gibi birçok parametre eş zamanlı izlenebilir.

Kablosuz veri aktarım modülü üzerinde bulunan lityum batarya şarj devresi, batarya izleme entegresi, SPI arayüzü ve RS485 bağlantı noktası, enerji yönetiminin verimli bir şekilde yapılmasını ve sistemin TARKONSİS kontrol yapısına sorunsuz bir şekilde entegre edilmesini sağlar. Kompakt ve çok yönlü tasarımı sayesinde bu modül, sera içi

iklim kontrolü, açık alan tarımında çevresel izleme, hassas gübreleme ve ilaçlama kontrolü gibi birçok tarımsal otomasyon senaryosu için ideal bir çözüm sunar.



Şekil 1. Kablosuz veri aktarım modülü donanımı.

1.3. Kontrol Modülü

Kontrol modülü, Şekil 3’de gösterildiği gibi sıcaklık, nem ve batarya durumu gibi kritik çevresel parametrelerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlar. Tarımsal süreçlerin izlenmesi ve yönetilmesi için geliştirilmiş yenilikçi bir çözümdür. Kullanıcı dostu 2.3 inç ekranı sayesinde sahadaki tüm sistem durumu anlık olarak görüntülenebilir ve gerekli durumlarda hızlı müdahale yapılabilir. Wi-Fi ve Bluetooth entegrasyonu ile sistemle kablosuz ve kesintisiz iletişim kurar. Harici sensör bağlantılarını destekleyen genişletilebilir yapısı sayesinde farklı tarımsal senaryolara kolayca uyum sağlar. Örneğin; sera ortamında CO₂ sensörü ya da açık alanda zararlı tespiti yapan sensörler ile entegre şekilde çalışabilir. Enerji verimliliği yüksek mimarisi, modülün tarım sahasında uzun süreli ve güvenilir biçimde çalışmasına olanak tanır. Bu yapı, kullanıcıya hem saha içi izleme hem de mobil cihazlar üzerinden

uzaktan takip ve kontrol imkânı sunar. TARKONSİS sistemine entegre edilen bu panel, çiftçilere ve tarım işletmelerine daha fazla kontrol, anlık karar alma kabiliyeti ve sürdürülebilir üretim avantajı sağlar.



Şekil 3. Kontrol modülü donanımı.

1.4. Yönetim ve İzleme Modülü

Yönetim ve izleme modülü, Şekil 4’de gösterildiği gibi sahadaki çevresel verilerin analiz edilmesi, sistem parametrelerinin kontrol edilmesi ve eyleyici modüllerin yönetilmesi gibi işlevleri merkezi olarak yürüten, çok bileşenli bir kontrol altyapısı sunmaktadır. Bu birim, özellikle kırsal ve altyapı açısından sınırlı bölgelerde kesintisiz iletişim ve güvenilir işlem kabiliyeti sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Donanımsal altyapısı, Mini PCI-E yuvaları üzerinden GSM (2G, NB-IoT, Cat-M1), GPS/GNSS ve Bluetooth/Wi-Fi modülleriyle geniş kablosuz haberleşme seçenekleri sunar. Mini PCI-E form yapısının sağladığı modülerlik ve fiziksel uyumluluk, sistemin farklı haberleşme teknolojileriyle entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve kablosuz iletişim altyapısında önemli bir esneklik kazandırmaktadır. Bu yapı sayesinde sistem, yalnızca hücresel bağlantılarla değil; aynı zamanda Bluetooth, Wi-Fi ve LoRa haberleşme protokolleri ile çalışabilir. Sağlanan çok protokollü yapı, TARKONSİS’in farklı coğrafi ve teknolojik koşullara adapte olabildiğini sağlamaktadır.

Yönetim ve izleme modülü üzerinde bulunan 4 adet bağımsız röle çıkışı, sulama vanaları, fanlar veya diğer elektro-mekanik eyleyicilerin doğrudan tetiklenmesine olanak tanır. Bununla birlikte, RS232 haberleşme arayüzü, sahada bulunan ekran modülleri veya harici cihazlarla veri alışverişi için kullanılmaktadır. Ayrıca 40V'a kadar izole edilmiş güç girişi, değişken enerji koşullarına karşı sistemin güvenli çalışmasını teminat altına alır. Kablosuz iletişim menzilini artırmak amacıyla entegre edilen UFL tipi harici anten bağlantısı, GSM, Wi-Fi veya LoRa modülleri ile birlikte sistemin haberleşme kararlılığını artırmaktadır. Micro USB arabirimi, sistem yazılımının sahada güncellenebilmesine veya yapılandırılabilmesine olanak sağlar. Genel olarak değerlendirildiğinde, Yönetim ve İzleme modülü diğer tüm bileşenlerinin işlevsel bütünlüğünü sağlayan modüler, genişletilebilir ve sahaya uyarlanabilir bir altyapı sunar. Böylece Tarım 4.0 kapsamında karar destek sistemlerinin uygulanabilirliğini sahaya taşır.

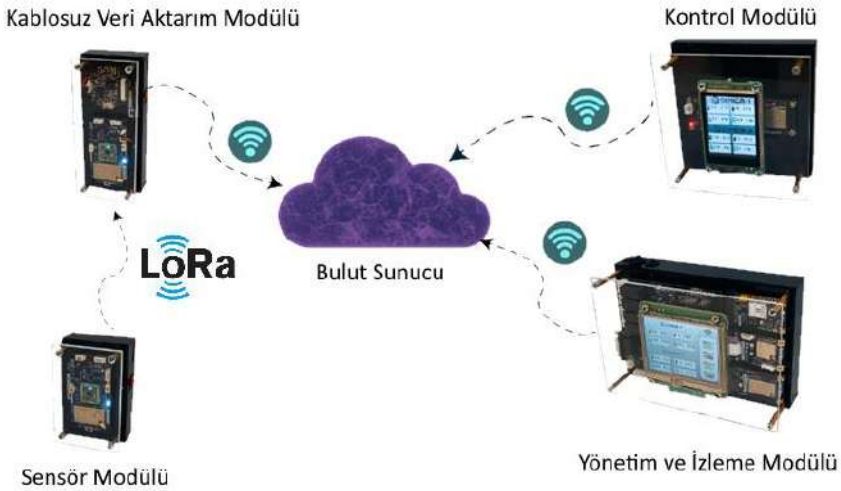


Şekil 4. Yönetim ve izleme modülü donanımı.

2. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yapılan donanım testleri ve saha denemeleri sonucunda, TARKONSİS sistemine ait bileşenlerin farklı tarımsal uygulama senaryolarında etkin biçimde çalıştığı gözlemlenmiştir. Özellikle kablosuz haberleşme altyapısına sahip sensör ve bağlantı modülleri, geniş alanlarda veri toplama ve iletim görevlerini düşük enerji tüketimi ile başarılı şekilde yerine getirmiştir. LoRa tabanlı sensör modülleri ile

1 kilometreyi aşan açık alan menziline kararlı veri aktarımı sağlanmış, RS485 protokolü üzerinden alınan sıcaklık, nem, toprak nemi ve batarya verileri bulut sunucuya eş zamanlı olarak iletilmiştir. Kontrol paneli, 2.3 inçlik ekran üzerinden tüm sistem parametrelerini anlık olarak sunarken, kullanıcıların sahadaki veriye doğrudan müdahale edebilmesine imkân tanımıştır. Yönetim ve izleme modülü üzerinden gerçekleştirilen röle kontrol testlerinde, sulama sistemleri ve fan kontrolü gibi görevler zamanlama doğruluğu ve güvenilirlik açısından başarılı bulunmuştur. Mevcut modüller kullanılarak Wi-Fi, Bluetooth ve NB-IoT haberleşme teknolojileri ile yapılan senaryo testlerinde veri kaybı yaşanmamış; mini PCI-E yapısının sağladığı modül esnekliği sayesinde haberleşme protokolü değişimlerinin sistem performansına olumsuz bir etkisi gözlenmemiştir. TARKONSİS sistem bileşenleri arasında sahadan bulut sunucuya veri akışı Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. TARKONSİS donanım bileşenleri ve sahadan sunucuya veri akışı.

Tüm sistemin enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, düşük güçlü mikrodenetleyici kullanımı ve entegre batarya yönetim avantajıyla tarımsal alanlarda uzun süreli ve kesintisiz çalışma elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, TARKONSİS sisteminin Tarım 4.0

kapsamında hem küçük ölçekli hem de büyük ölçekli tarım alanlarında yaygın olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Demsay Elektronik Ar-Ge Merkezi tarafından geliştirilen TARKONSİS uygulaması tüm donanım bileşenleri ile sunulmuştur. Geliştirilen sistem Tarım 4.0 konseptine uygun olarak sahadaki çevresel verilerin izlenmesi, analiz edilmesi ve otomatik olarak yönetilmesine imkân tanıyan modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Sensör ve bağlantı modüllerinin düşük enerji tüketimi ile uzun süreli çalışabilmesi, sistemin kırsal ve altyapıdan yoksun alanlarda bile kesintisiz hizmet verebilmesini sağlamaktadır. Mini PCI-E tabanlı haberleşme altyapısı sayesinde farklı protokoller arasında geçiş yapılabilmekte; GSM, NB-IoT, Bluetooth, Wi-Fi ve LoRa gibi haberleşme teknolojileri sistem içerisinde sorunsuz biçimde kullanılabilmektedir. TARKONSİS sahip olduğu esnek donanım bileşenleri ile hem küçük ölçekli üreticiler hem de büyük tarım işletmeleri için kolay uyarlanabilir ve genişletilebilir bir çözüm sunma potansiyeline sahiptir. TARKONSİS, akıllı tarım uygulamalarında otomasyonun yaygınlaştırılması, karar destek süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılması açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Gelecekte sistemin yapay zekâ tabanlı karar destek modülleriyle güçlendirilerek otonom tarım uygulamalarında da kullanılabiliirliği hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- FAO. (2022). Digital agriculture: Supporting smallholder farmers in the transition. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc3080en>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2023). Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications. *Science of the Total Environment*, 889, 164200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164200>
- Soy, H., & Dilay, Y. (2021). A conceptual design of LoRa based weather monitoring system for smart farming. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 906–910. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011947>
- Soy, H. (2023). Coverage analysis of LoRa and NB-IoT technologies on LPWAN-based agricultural vehicle tracking application. *Sensors*, 23(21), 8859. <https://doi.org/10.3390/s23218859>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T. C., Pesonen, L. A., Green, O., & Sørensen, C. G. (2020). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering*, 191, 60–84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>
- Zhang, Y., Li, R., & Wang, L. (2025). Microclimate control strategies in greenhouses to prevent pest and disease outbreaks. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1492760. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1492760>

BÖLÜM 3

TARIMSAL ATIKLARDAN BİYOGAZ ÜRETİMİNDE SORUNLAR VE ÖNERİLER*

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

GİRİŞ

Anaerobik fermentasyon yoluyla atıktan enerji geri kazanımında günümüzde karşılaşılan kritik zorluklar arasında, lignoselülozik atıkları biyogaza dönüştürmedeki düşük verimlilik öne çıkmakta ve sürecin ekonomik uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Tarımsal üretim ve orman artıklarının üretimi, bileşimi ve mekansal dağılımını doğru bir şekilde ölçmek için birleşik bir küresel sistemin olmaması, biyogaz fermentörlerinin stratejik planlamasını ve tüm biyogaz değer zincirinin optimizasyonunu engellemektedir. Birçok zorluk, biyogazın şebeke elektriği üretiminde ve ısı uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmasını sınırlar. Bu sınırlamalar arasında, özellikle kırsal alanlarda biyogaz sistemlerini işletmek ve sürdürmek için düşük teknik kapasite ve biyogaz sistemleri için yedek parça bulunabilirliği yer alır. Bunun nedeni, çoğu bileşenin yatırımcılardan, özellikle gelişmekte olan ülkeler için, çok az veya hiç teknik destek almadan yabancı ülkelere tedarik edilmesidir. Yerel kapasite ve daha fazla yerel içerik oluşturmak, biyogaz sistemlerinin teknik sürdürülebilirliğini iyileştirecektir. Düşük besleme tarifeleri ve şebekelerin küçük dağıtık elektrik kaynaklarının bağlanması için kapasitelerinin düşük olması, biyogazın elektrik sistemlerine daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki bir diğer sınırlamadır.

***Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.**

Diğer sınırlamalar arasında şebekeye bağlı üretim fırsatlarının eksikliği, fizibilite çalışmaları açısından yüksek ön maliyetler, finansal engeller, tasarım kapasitesi, inşaat, işletme ve bakım; yasal ve politik engeller ve fosil yakıtlı enerji sistemlerine kıyasla kısmen yüksek üretim ve bakım maliyetleri ve biyogaz programlarını desteklemeyen değişen ve kısa ömürlü düzenleyici programlar bir araya geldiğinde şebekeye bağlı biyogaz sistemlerinin geliştirilmesini zorlaştırır.

Rekabetçi bir piyasadaki çeşitli teknik ve ekonomik zorluklar nedeniyle biyogazdan elektrik üretiminin geliştirilmesi gerekiyorsa, kolaylaştırıcı yasal ve politik çerçevenin uygulamaya konulması gerekir. Almanya'da, biyogazdan elektrik üretimi sadece şebeke bağlantısı ve cazip besleme tarifeleri nedeniyle karlıdır. Yatırım odaklı finansal desteğe kıyasla çıktı odaklı destek planlarının biyogaz elektrik üretimini teşvik etmede daha etkili ve başarılı olduğu belirtilmektedir. Biyogazdan elektrik üretimini teşvik etmek için, biyogaz santrallerinin kurulumunu desteklemek üzere sübvansiyonlar ve kamu mali destek önlemlerinin uygulamaya konulması gerekir. Uygun besleme tarifelerinin geliştirilmesi, verimli elektrik santrallerinin inşasını ve bunların sürekli ve verimli bir şekilde çalışmasını teşvik eder.

Biyogaz enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, hem yatırım ve teknoloji yoluyla biyogaz üretiminin yatırımını ve tanıtımını hem de daha ucuz yenilenemeyen seçeneklere sahip rekabetçi bir enerji pazarında biyogaz tüketimini teşvik eden önlemler yoluyla talebin yaratılmasını gerektirir. Bu durum, hem biyogaz enerji kaynaklarının üretimine hem de tüketimine yatırımı teşvik etmek için politika ve yasal önlemlerin uygulamaya konulduğu kurumsal bir çerçeve gerektirir. Biyogaz enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, hem yatırım ve teknoloji yoluyla biyogaz üretiminin yatırımını ve tanıtımını hem de daha ucuz yenilenemeyen seçeneklere sahip rekabetçi bir enerji pazarında biyogaz tüketimini teşvik eden önlemler yoluyla talebin yaratılmasını gerektirir. Bu durum, hem biyogaz enerji kaynaklarının üretimine hem de tüketimine yatırımı teşvik etmek için

politika ve yasal önlemlerin uygulamaya konulduğu kurumsal bir çerçeve gerektirir.

1. BİYOGAZ ÜRETİMİ VE KULLANIMINDAKİ ZORLUKLAR

Teknik, ekonomik ve düzenleyici zorluklar biyogazın büyük ölçekli uygulanmasını sınırlamaktadır. Tarımsal üretim ve orman atıklarından biyogaz üretiminin zorlukları ve gelecek beklentilerine küresel ve disiplinlerarası bir yaklaşım gereklidir. Bu nedenle, belirlenen başlıca bilgi boşlukları, kritik zorluklar ve öncelikli araştırma konuları aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

1.1. Bilgi Boşlukları

Lignoselülozik atıkların anaerobik fermentasyonu, verimliliğini ve büyük ölçekli uygulamasını sınırlayan çeşitli bilimsel ve teknik zorluklarla karşı karşıyadır. Başlıca zorluklardan biri, kimyasal bileşimleri, özellikle karbon-azot (C/N) oranı ve lignin içeriği, ürün türüne, hasat yöntemine ve iklim koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğinden, lignoselülozik materyallerin karakterizasyonudur. Bu heterojenlik, süreç kararlılığını etkiler ve tutarlı biyogaz üretimini engeller. Bu nedenle fermentasyon değişkenlerini optimize etmek için ayrıntılı karakterizasyon gereklidir. Bu duruma, mikrobiyal toplulukların yapısı ve işlevi hakkında bilgi eksikliğinin daha sağlam ve verimli biyokatalizörlerin geliştirilmesini engellemesi nedeniyle, süreçte yer alan mikrobiyal dinamiklerin sınırlı anlaşılması da eklenmektedir. Bir diğer kritik konu, biyorafinerilerde biyokimyasal ve termokimyasal teknolojilerin etkili bir şekilde entegre edilmesi hakkında bilgi eksikliğidir. Bu durum, biyogaz ve diğer biyoürünlerin üretimini en üst düzeye çıkarmak için anahtar niteliğindedir. Ayrıca, depolama ve işleme sırasında kaçak metan emisyonlarının kantifikasyonu ve fermentasyon ürünü türevli biyogübrelerin kullanımının uzun vadeli değerlendirilmesi de dahil olmak üzere atık verilerinin standardizasyonu ve kullanılabilirliğinde

önemli boşluklar bulunmaktadır. Bu emisyonlar, uygun şekilde kontrol edilmezse, biyogazın iklim faydalarını tehlikeye atabilir. Tarımsal üretim ve orman artıklarının üretimi, bileşimi ve mekansal dağılımını doğru bir şekilde ölçmek için birleşik bir küresel sistemin olmaması, biyogaz fermentörlerinin stratejik planlamasını ve tüm biyogaz değer zincirinin optimizasyonunu engellemektedir.

1.2. Güncel Önemli Zorluklar

Anaerobik fermentasyon yoluyla atıktan enerji geri kazanımında günümüzde karşılaşılan kritik zorluklar arasında, lignoselülozik atıkları biyogaza dönüştürmedeki düşük verimlilik öne çıkmakta ve sürecin ekonomik uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bunun nedeni, bu materyallerin yapısal dayanıklılığı ve daha etkili ve ekonomik ön işlemlere duyulan ihtiyaç ile metan üretimini artırmak için enzimolojideki gelişmelerdir. Ayrıca, gübre gibi azot açısından zengin atıklarda yaygın olan amonyak inhibisyonu, metan üretimini %40 düzeyine kadar azaltabilirken, bozunmayı artırmak için gereken ısı ve kimyasal ön işlemler enerji maliyetlerini %15–30 oranında artırarak sistemin karlılığını daha da tehlikeye atmaktadır (UNDP, 2021). İkinci olarak, tesislerin hem inşası ve işletimi hem de atık toplama ve taşıma lojistiği ile ilişkili yüksek üretim maliyetleri, özellikle dağınık alanlardan yapılan taşımacılığın işletme maliyetlerinin %35 ile %50'sini temsil edebildiği kırsal alanlarda, bunların uygulanmasına yönelik önemli engeller oluşturmaktadır (EERA, 2024). Bu durum, hasadın yılın sadece dört ayında yoğunlaştığı ve biyofermentörlerde uzun süreli hareketsizlik dönemleri yarattığı yağmurla beslenen tarım sektörlerinde daha da kötüleşmektedir. Uyarlanabilir finansal modellerin ve teknik eğitimin eksikliği, düşük gelirli ülkelerdeki tesislerin sadece %12'sinin beş yıldan uzun süre faaliyette kalması gerçeğinde görüldüğü gibi, projelerin sürdürülebilirliğini de etkilemektedir (EERA, 2024). Son olarak, net bir düzenleyici çerçevenin ve etkili teşvik politikalarının olmaması, bu teknolojilerin yatırımını ve yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir. Bunların geliştirilmesini ve uygulanmasını destekleyen tutarlı düzenlemeler ve

ekonomik teşvikler oluşturmak önemlidir (Weldesemayat ve Ark., 2025).

1.2.1. Biyogazdan Elektrik Üretimindeki Zorluklar

Birçok zorluk, biyogazın şebeke elektriği üretiminde ve ısı uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmasını sınırlar. Bu sınırlamalar arasında, özellikle kırsal alanlarda biyogaz sistemlerini işletmek ve sürdürmek için düşük teknik kapasite ve biyogaz sistemleri için yedek parça bulunabilirliği yer alır. Bunun nedeni, çoğu bileşenin yatırımcılardan, özellikle gelişmekte olan ülkeler için, çok az veya hiç teknik destek almadan yabancı ülkelere tedarik edilmesidir. Yerel kapasite ve daha fazla yerel içerik oluşturmak, biyogaz sistemlerinin teknik sürdürülebilirliğini iyileştirecektir. Düşük besleme tarifeleri ve şebekelerin küçük dağıtık elektrik kaynaklarının bağlanması için kapasitelerinin düşük olması, biyogazın elektrik sistemlerine daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki bir diğer sınırlamadır. Diğer sınırlamalar arasında şebekeye bağlı üretim fırsatlarının eksikliği, fizibilite çalışmaları açısından yüksek ön maliyetler, finansal engeller, tasarım kapasitesi, inşaat, işletme ve bakım; yasal ve politik engeller ve fosil yakıtlı enerji sistemlerine kıyasla kısmen yüksek üretim ve bakım maliyetleri ve biyogaz programlarını desteklemeyen değişen ve kısa ömürlü düzenleyici programlar bir araya geldiğinde şebekeye bağlı biyogaz sistemlerinin geliştirilmesini zorlaştırır.

Aşağıda belirtilen eksiklik ve olumsuzluklar birçok gelişmekte olan ülkede biyogaz kullanımının sağlıklı rekabeti ve müşteri/ürün odaklılık gibi faydaları engellemektedir:

- Ülkenin enerji sektörlerindeki tekelleri yapılar
- Gaz şebekesine erişim için net kuralların olmaması
- Atık işinde koruyucu yapılar ve paydaşlar
- Biyogaz dağıtımını ve kullanımını kolaylaştıracak boru hattı şebekesinin olmaması
- Geleneksel motorlarla rekabet edebilecek yüksek verimli ağır hizmet tipi biyogaz motorlarının olmaması

- Fosil yakıtlar yerine biyogaz kullanmanın ekonomik avantajları hakkında son kullanıcılar arasında yetersiz bilgi
- Biyogazın sürekli üretimi ve işletimini sürdürmek için düşük elektrik talebi
- Tesisleri işletmek için elektrik ve diğer ilgili maliyetleri ödeyememe
- Sistemlerin işletimi ve bakımındaki zorluklar
- Biyogaz teknolojisi ve elektrik üretimi hakkında sınırlı bilgi
- Biyogazdan gübreye olan talebin mevsimsel değişkenliği
- Fermentörlerin ve jeneratörlerin işletilmesi için zayıf biyokütle tedarik zinciri
- Planların işletilmesinde ölçek ekonomisinin olmaması
- Güç ve diğer ürünlerin birim maliyetlerinin yüksek olması

2. BİYOGAZ ÜRETİMİ VE KULLANIMI İÇİN ÖNERİLER ZORLUKLAR

3.1. Biyogazdan Şebeke İçin Elektrik Üretimini Teşvik Etmek İçin Önlemler

Biyogazın enerji dönüşümünde öncü bir rol oynaması için, anaerobik fermentasyonun faydalarının bireylere, çevreye ve toplumun tamamına ulaşması için çeşitli önlemler önerilmektedir. Biyogaz tesislerinin çeşitlendirilmiş uygulaması, küçük biyogaz tesisleri için ekonomik açıdan mantıklı olacaktır. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, anaerobik fermentasyon teknolojisi yerel olarak mevcut biyolojik atıkları tüketerek GHG emisyonlarını azaltır. Biyogaz üretiminin yan ürünü olan fermentasyon sıvısı, sürdürülebilir tarımsal üretimde kullanılabilir.

3.2. Politika Çıkarımları Ve Öneriler

Biyogazdan şebeke için elektrik üretmek ve diğer yüksek teknoloji uygulamaları için çeşitli politik ve teknik düzenlemeler gereklidir. Bu düzenlemeler şunlardır:

- Küçük çiftçiler ve diğer kırsal topluluklar tarafından biyogazın elektrik yatırıma teşvik edilmesi için uygun kurumsal reformlar ve düzenlemeler
- Yerel ihtiyaçlar ve koşullar açısından etkili ve güvenilir teknoloji
- Biyokütle ve merkezi olmayan üretim konusunda toplumsal duyarlılığı artırmak için farkındalık programları
- Güvenilir biyogaz ve elektrik üretimi için uygun fermentör ve güç sistemlerinin bakımı
- Biyogaz ve enerji/elektrik sistemleri için tesis ve ekipmana erişim ve finansal sübvansiyonların sağlanması
- Yerel uzmanlığın geliştirilmesi
- Yatırımı uygulanabilir ve sürdürülebilir kılmak için elektrik şebekesine cazip besleme tarifi
- Yasal ve düzenleyici engelleri sınırlama muafiyetleri

Rekabetçi bir piyasadaki çeşitli teknik ve ekonomik zorluklar nedeniyle biyogazdan elektrik üretiminin geliştirilmesi gerekiyorsa, kolaylaştırıcı yasal ve politik çerçevenin uygulamaya konulması gerekir. Almanya’da, biyogazdan elektrik üretimi sadece şebeke bağlantısı ve cazip besleme tarifeleri nedeniyle karlıdır. Yatırım odaklı finansal desteğe kıyasla çıktı odaklı destek planlarının biyogaz elektrik üretimini teşvik etmede daha etkili ve başarılı olduğu belirtilmektedir.

Biyogazdan elektrik üretimini teşvik etmek için, biyogaz santrallerinin kurulmasını desteklemek üzere sübvansiyonlar ve kamu mali destek önlemlerinin uygulamaya konulması gerekir. Uygun besleme tarifelerinin geliştirilmesi, verimli elektrik santrallerinin inşasını ve bunların sürekli ve verimli bir şekilde çalışmasını teşvik eder. Biyogazdan elektrik üretimini teşvik etmek için uygulamaya konulması gereken diğer faktörler şunlardır:

- Biyogaz güç üretim fırsatları ve teşvikleri konusunda farkındalık yaratılmalıdır.
- Vergi teşvikleri ve ucuz ve kolay ulaşılabilen finansmana erişim yoluyla yüksek yatırım maliyetleri azaltılmalıdır.

- Güç santrali proje tasarımı, inşası, işletimi ve bakımında yerel kapasite geliştirilmelidir.
- Merkezi olmayan üretimi teşvik ederek, küçük ölçekli biyogaz üreticilerinin koşullara göre elektrik satan ve tüketen (üreten tüketici) olarak faaliyet göstermelerine olanak sağlanmalıdır. Bu durum, akıllı şebekelerin kırsal alanlara genişletilmesi ve cazip besleme tarifeleri yoluyla gerçekleştirilebilir.

3.3. Biyogaz Uygulaması İçin Küresel Yol Haritası

Tarımsal üretim ve orman atıklarından üretilen biyogazın uygulanması, özellikle kırsal ve kent çevresindeki alanlarda sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasına, besin döngülerinin kapatılmasına ve sürdürülebilir enerji üretilmesine önemli ölçüde katkıda bulunur. Sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonominin belirgin bir vizyonu ile teknolojik, politik, ekonomik ve sosyal olmak üzere dört boyuttaki eylemleri birleştiren bir yol haritası Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Biyogaz Uygulamaları İçin Teknolojik, Politik, Ekonomik Ve Sosyal Boyutların Dikkate Alındığı Yol Haritası (Uranga-Valencia ve Ark., 2025)

<i>Aşamalar</i>	<i>Temel Eylemler</i>	<i>Paydaşlar</i>	<i>Beklenen Sonuçlar</i>
1. Aşama: <i>Teşhis ve planlama</i>	➤ Mevcut atıkların değerlendirilmesi ➤ Yerel paydaşların belirlenmesi ➤ Düzenleyici ve finansal tanılama	• Yerel yönetimler • Üniversiteler • Sivil toplum kuruluşları (STK)	✓ Biyogaz için fırsatlar haritası
2. Aşama:	➤ Pilot	• Ar-Ge	✓ Yerel

<i>Teknolojik geliştirme ve pilot tesis</i>	biyofermentörlerin kuruluşu ➤ Teknik ve sosyoekonomik doğrulama ➤ İlk eğitim	merkezleri • Kırsal topluluklar • Özel sektör	bağlama göre ayarlanmış tekrarlanabilir modeller
3. Aşama: <i>Ölçeklendirme ve finansman</i>	➤ Başarılı sistemlerin bölgesel olarak genişletilmesi ➤ Finansmana erişim ➤ Sübvansiyonlar ve vergi teşvikleri	• Mali kurumlar • Ulusal hükümetler • İşbirliği ajansları	✓ Kırsal enerji kapsamında artış
4. Aşama: <i>Kamu politikalarına entegrasyon</i>	➤ Biyogazın ulusal iklim ve enerji planlarına dahil edilmesi ➤ Sağlam düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesi	• Enerji ve Çevre Bakanlıkları	✓ Enerji dönüşümünün bir ayağı olarak biyogazın konsolidasyonu
5. Aşama: <i>İzleme ve sürekli iyileştirme</i>	➤ Etki değerlendirmesi ➤ Teknoloji yükseltmesi ➤ Topluluk güçlendirme	• Sivil toplum, • Üniversiteler • Hükümetler	✓ Yüksek iklimsel ve sosyal etkiye sahip sürdürülebilir sistemler

Tarımsal üretim ve orman atıklarından üretilen biyogazın uygulanması, teknolojik yeniliği, sağlam düzenleyici çerçeveleri,

ekonomik uygulanabilirliği ve toplum katılımını birleştiren kapsamlı ve aşamalı bir yaklaşım gerektirir. Bu çok boyutlu yol haritası, çözümlerin sadece yerel bağlamalara göre uyarlanmasına olanak sağlamakla kalmaz, aynı zamanda adil ve sürdürülebilir bir enerji geçişini teşvik ederek biyogazı kırsal kalkınma ve iklim değişikliğinin azaltılması için önemli bir araç olarak pekiştirir.

3.3. Gelecekteki Araştırma Konuları

Anaerobik fermentasyon (AD) yoluyla atık-enerji geri kazanımındaki ilerleme, çok sayıda teknolojik yenilik ve kamu politikası tarafından desteklenmektedir. İlk olarak, mikroorganizma ve enzim mühendisliği yoluyla gelişmiş biyokatalizörlerin geliştirilmesi, özellikle lignoselülozik materyallerin bozunmasında anaerobik fermentasyonun verimliliğini önemli lde iyileştirmeyi vaat etmektedir. Buna paralel olarak, biyokimyasal ve termokimyasal süreçleri birleştiren entegre biyorafinerilerin optimizasyonu, biyogaz ve diğer katma değerli yan ürünlerin üretimini en st düzeye çıkararak bu sistemlerin karlılığını artırmaktadır. Gelişmiş hesaplama araçları kullanılarak yapılan süreç modelleme ve simülasyon, daha verimli tesislerin tasarımını ve işletimini kolaylaştırır ve uydu, iklim ve atık bileşimi verilerini tesislerin yerini ve tasarımını optimize etmek için entegre eden tahmini platformlar gibi yapay zeka uygulamalarıyla tamamlanır. Nem ve C/N oranı gibi kritik değişkenlerin hızlı yerinde analizi için taşınabilir NIR spektroskopisi kullanılır. Ayrıca, orman atığı hidroliz süresini %50 oranına kadar azaltan ligninolitik mantarlar kullanan düşük maliyetli enzimatik yöntemler (EERA, 2024) ve besin dengesini iyileştiren ve metan üretimini %25–35 oranında artıran mikroalglerle birlikte fermentasyon dahil olmak üzere sürdürülebilir ön işleme teknolojileri de geliştirilmektedir. Sistemsel bir yaklaşım, biyofermentrleri hidroponik sistemlerle birleştirerek atık suyun %100’n tarımsal besin olarak yeniden kullanmak (EERA, 2024) veya kalan CO₂’i gten gaza dönüştürme teknolojileri kullanarak sentetik yakıtlara dönüştürmek (EERA, 2024) gibi entegre döngüsel ekonomi modellerini teşvik eder. Son olarak, izlenebilirlik ve karbon

ayak izi düşük olan biyogübreler için uluslararası sertifikasyon programları ve marjinal tarım alanlarında bitkisel üretimi teşvik eden, enerji dayanıklılığını ve kırsal kalkınmayı güçlendiren karma kamu-özel finansman mekanizmaları gibi yenilikçi kamu politikalarının geliştirilmesi önemlidir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Biyogaz teknolojisi, esas olarak olgun üretim teknolojilerinin ve uygulamalarının yanı sıra, gelecek vaat eden teknolojilerin varlığı nedeniyle küresel olarak umut vadeden bir girişimdir. Biyogaz teknolojisi, ucuz hammaddelerin bol miktarda tedarik edilmesi ve ısıtma, güç üretimi, yakıt olarak kullanım ve hidrojen ve karbondioksit ve biyoyakıtlar dahil olmak üzere, sürdürülebilir kimyasalların daha fazla işlenmesi ve üretimi için hammadde olarak çok çeşitli biyogaz uygulamalarının bulunması nedeniyle uygulanabilir ve sürdürülebilirdir. Küçük ölçekliden büyük ölçekli endüstriyel boyutta fermentörlere ve geniş bir uygulanabilir hammadde yelpazesine kadar biyogaz üretiminin esnekliği, biyogazın küresel olarak her yerde üretilmesine olanak tanır. Biyogaz üretimi ve kullanımı küresel olarak büyümektedir ve yenilenebilir biyoenerji üretmek için önde gelen ekonomik bir alternatif olma vaadi taşımaktadır.

Biyogaz, daha az sera gazı (GHG) emisyonu ürettiği için çok yönlü bir yakıttır. Yenilenebilir kaynaklardan üretildiği için yenilenebilirdir. Biyogaz üretimi, biyokütledeki patojenleri dezenfekte ederek bertaraf için organik atık miktarını arıtmak ve azaltmak için kullanılabilir. Elektrik, ısı ve soğutma uygulamaları için geniş bir enerji uygulamaları portföyüne sahiptir. Biyokütleden üretilen biyogaz verimi, hammadde materyalinin uygun şekilde ön işlenmesi ve C/N oranı, sıcaklık ve materyal seyreltmesi gibi fermentasyon değişkenlerinin izlenmesiyle artırılabilir. Biyogazdan elektrığe dönüşüm için birçok teknoloji mevcuttur. Ancak kojenerasyon/trijenerasyon daha yüksek dönüşüm verimlilikleri sağlarken, yakıt hücreleri en yüksek sistem güvenilirliğine sahiptir. Belirlenen ve önerilen diğer teknolojiler arasında küçük gaz türbini ve

mikro gaz türbini, dizel motorları, benzinli motorlar, *Stirling* motorları, yakıt hücreleri, biyometan dönüşümü, biyoyakıt işleme ve hidrojen üretimi yer almaktadır. Yakıt olarak biyogaz, sürdürülebilir enerji geçişinde elektrik ve ısı üretiminde doğrudan ve dolaylı kullanım için önemli fırsatlar sunmaktadır. Güç üretimi ve yakıt üretimindeki uygulama ile biyogaz, elektrik üretimi ve ısı uygulamalarda fosil yakıtların yerine geçer. Şebeke için elektrik üretimi ve tedariki yoluyla biyogazın, merkezi olmayan üretimde ve yatırımcıların hem üretici hem de tüketici olduğu, diğer bir deyişle üreten tüketici işletmelerde özel bir rolü vardır. Dolayısıyla biyogaz enerjisinin küresel enerji geçişinin ekonomik sürdürülebilirliğinde önemli bir rolü vardır.

Enerji geçişinin çevresel sürdürülebilirliği konusunda, biyogaz kullanımı küresel sera gazı (GHG) emisyonlarını ve küresel ısınma ve iklim değişikliği tehdidini azaltır. Biyogaz kullanımı, küresel olarak mevcut olan fazla miktarlardaki tarımsal atıkların zararlı çevresel ve sağlık etkilerini önleyerek çevrenin temiz tutulmasına yardımcı olur. Bu nedenle, biyogaz geçim kaynağı olarak tarıma ve nakite güvenen insanlığın önemli sorunlarına finansal, ekonomik, çevresel ve sağlık açısından önemli yararlar sağlar. Sosyal enerji sürdürülebilirliği konusunda, tarımsal atıkları kullanan biyogaz tesislerine planlanan yatırım, iş yaratmaya ve ek gelir akışları üretmeye yardımcı olacak, dolayısıyla işsizliği azaltarak küçük çiftçi tarımının gelirini ve dolayısıyla sürdürülebilirliğini iyileştirecek ve çiftçileri düşük karbonlu ve yeşil elektrik ve enerji geleceğine geçişe dahil ederek topluma büyük bir olumlu etki bırakacaktır. İnsanlığın üçte ikisinden fazlasının küresel olarak geçimini tarımdan sağladığı, bitkisel üretim ve hayvancılığın ise tüm insanlığa hayatta kalmak için ihtiyaç duyduğu yiyeceği sağladığı dikkat çekicidir. Merkezi olmayan üretim yoluyla, yerel olarak mevcut biyokütle, biyogaz kullanılarak şebeke elektriği üretiminde kullanılacak ve dolayısıyla kırsal ekonomileri dönüştürecek, güç sistemlerini dengeleyecek ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin 7. hedefinin gerçekleştirilmesine yardımcı olacaktır.

Biyogaz enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı, hem yatırım ve teknoloji yoluyla biyogaz üretiminin yatırımını ve tanıtımını hem de daha ucuz yenilenemeyen seçeneklere sahip rekabetçi bir enerji pazarında biyogaz tüketimini teşvik eden önlemler yoluyla talebin yaratılmasını gerektirir. Bu durum, hem biyogaz enerji kaynaklarının üretimine hem de tüketimine yatırımı teşvik etmek için politika ve yasal önlemlerin uygulamaya konulduğu kurumsal bir çerçeve gerektirir. Biyogaz, dizel motorlar, benzinli motorlar, *Stirling* motorlarının kullanımı ve açık veya kombine çevrim yapılandırmalarında mikro, küçük, orta ve büyük türbinlerle gaz türbini teknolojisi gibi çeşitli mevcut teknoloji seçenekleri kullanılarak elektriğe dönüştürülebilir. Diğer teknolojiler, yenilenebilir bir elektrik üretim kaynağı oluşturan hidrojene dönüştürme ve yakıt hücresi uygulamasıdır. Biyometanasyon veya biyogazın biyometana dönüştürülmesi, yenilenebilir gaz olarak doğal gaz boru hattına enjekte edilebilen bir yakıt olarak ısı ve güç üretiminde doğrudan kullanım için başka bir yöntemdir. Biyogaz motorları, geleneksel sıkıştırma ateşlemeli ve kıvılcım ateşlemeli motorların modifikasyonu ile üretilir. Tam ve kısmi dönüşüm yapılabilir. Mikrotürbinler, içten yanmalı motorlara kıyasla daha az sıkı kalite gereklilikleriyle biyogaz kullanma avantajına sahip açık veya kombine çevrim tasarımlarında, daha büyük gaz türbinleri kullanılarak, küçük ve büyük ölçekte biyogazdan elektrik üretmek için kullanılabilir. Ancak, çalıştırılması ve bakımı daha teknik ve karmaşıktır.

Biyogazın dolaylı kullanımı, biyogazı ulaşım yakıtlarına dönüştürmeyi ve elektrik üretimini içerir. Dolaylı kullanım süreçlerinde, biyogazdan doğrudan ısı ve güç üretimi (CHP), temizlenmiş biyogaz için CNG ve LPG'ye sıkıştırma, sentez gazı üretmek için yeniden yapılandırmadan önce temizleme ve saflaştırma, metanol ve benzin üretmek için kısmi oksidasyon ve çeşitli kimyasallar, benzin, dizel ve jet yakıtları üretmek için *Fischer-Tropsch* işlemi kullanılır. Bu tür uygulamalar, toplam sera gazı (GHG) emisyonlarının yaklaşık %14'ünü oluşturan ulaşım sektöründen

kaynaklanan emisyonları büyük ölçüde azaltacaktır. Ulaşım ve diğer uygulamalar için çeşitli yakıtlar biyogazdan üretilebilir. Bu yakıtlar arasında sıkıştırılmış biyogaz (CBG), sıvı biyogaz (LBG), metanol, hidrojen, dimetil eter ve *Fischer-Tropsch* (FT) yakıtları yer alır. Biyogazdan yakıt üretimi için iki farklı yöntem vardır:

- 1) Sıkıştırarak üretmeden önce biyometana yükseltme (CBG) veya sıvılaştırarak üretme (LBG) veya
- 2) Hidrojen, metanol, DME ve FT dizel yakıt sentezi için sentez gazı üretmek üzere biyogazın gazlaştırılması

Sıkıştırılmış biyogaz günümüzde diğer seçeneklere göre küçük ölçekli uygulamalar için ekonomik olarak uygulanabilir bir seçenektir. Sıvı biyogaz ise ağır hizmet tipi araçlarda ve nakliyyede sıvı doğal gazın yerine kullanılabilir. Biyogazdan üretim potansiyeli olan diğer yakıtlar hidrojen, ME ve FT dizeldir ancak henüz ticari ölçeklerde yaygınlaşmamıştır.

Küçük çiftliklerde şebekeye bağlı güç üretmek mümkündür. Ancak vergi indirimi, krediye erişim, teknik destek ve akıllı şebekelerin geliştirilmesi gibi politika girişimlerinin merkezi olmayan üretimi ve mikro şebekelerin geliştirilmesi gerekir. Cazip besleme tarifeleri, merkezi olmayan güç üretimi ve mikro şebeke teknolojilerini veya değişken yenilenebilir enerjinin elektrik şebekesine alınmasını artıran daha gelişmiş akıllı şebeke teknolojilerini teşvik ederek, çiftçilerden ve diğer küçük ölçekli yatırımcılardan şebekeye bağlı elektrik üretimine yatırımı da teşvik edecektir. Verimli dönüşüm teknolojilerinin ve ekipmanlarının geliştirilmesi ve benimsenmesi, gelecekteki enerji dönüşümünde yeşil ve düşük karbonlu kaynaklara biyogazın daha geniş bir şekilde benimsenmesi ve kullanılması için önemli bir stratejidir. Biyogazın bir yakıt olarak karşı karşıya olduğu temel zorluklar, farklı çıktı kalitesi, motor parçaları için aşındırıcı olan hidrojen sülfür gibi safsızlıkların varlığı, hidrojen ve yakıt hücreleri gibi umut vaat eden uygulamalarda düşük düzeyde teknolojik ilerleme ve biyometan üretimi ve işlenmesinin yüksek maliyetleridir. Bu nedenle biyogazın elektrığe dönüştürülmesi ve biyoyakıt dönüşümünün küresel enerji

dönüşümünde ve iklim/emisyon hedeflerinin gerçekleştirilmesinde sürdürülebilir bir uygulamadır.

Biyogaz, ucuz hammaddelerin bol miktarda tedarik edilmesi ve ısıtma, güç üretimi, yakıt ve hidrojen, karbondioksit ve biyoyakıtlar dahil sürdürülebilir kimyasalların işlenmesi ve üretimi için hammaddelerde çok çeşitli biyogaz uygulamalarının bulunması nedeniyle rekabetçi, uygulanabilir ve genel olarak sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Biyogaz bazlı enerjinin kapasitesi son on yıldır hızla artmaktadır. Dünyada biyogazdan elektrik üretim kapasitesi 2010 yılında 65 GW'tan 2019 yılında %90 oranında bir artışı temsil eden 120 GW düzeyine ulaşmıştır. Bu bölümde, enerji geçişinde biyogazın güç üretimi ve yakıt üretimi uygulamalarına göre kullanım yöntemleri incelenmiştir. Biyogazdan elektrik üretimi için Dizel motorlar, benzinli motorlar, türbinler, mikrotürbinler ve *Stirling* motorları kullanılır. Biyogaz yakıtı, geleneksel içten yanmalı motorlarda çeşitli derecelerde değişikliklerle hem ateşlemeli (benzin) hem de sıkıştırma ateşlemeli (dizel) motorlarda kullanılabilir. İçten yanmalı motorlarda, çift yakıt modu, büyük değişiklikler gerektirebilen gaz motorlarına tam dönüşüme kıyasla, çok az veya hiç değişiklik yapılmadan kullanılabilir. Biyogaz ayrıca yakıt hücrelerinde doğrudan elektriğe ve hidrojen için ham maddeye dönüşüm ve sürdürülebilir enerji gelişimine giden önemli bir uygulama olan ulaşım yakıtı üretimi için kullanılabilir. Zenginleştirilmiş biyogaz veya biyometan, yenilenebilir doğal gaz olarak kullanılmak üzere konteynır ile taşınabilir veya gaz tedarik şebekesine enjekte edilebilir. Biyogaz, doğrudan yemek pişirme ve aydınlatma için, ayrıca elektrik üretimi ve *Fischer-Tropsch* (FT) yakıt üretimi için kullanılabilir. Yükseltilmiş biyogaz/biyometan metanol yakıtını işlemek için de kullanılabilir. Sıkıştırılmış biyogaz (CBG) ve sıvı biyogaz (LBG), ulaşım ve güç üretimi için yakıt olarak çeşitli doğrudan ve dolaylı uygulamalar için biyometandan geri dönüşümlü olarak üretilir. Biyogaz, kombine ısı ve güç üretimi (CHP)/trijenerasyon uygulamaları ve sıkıştırılmış biyo-CNG ve biyo-LPG üretiminde kullanılabilir. Yakıtlar, temizleme ve sentez gazına dönüştürülmeden önce saflaştırma ve benzin yapmak için

kullanılabilen metanol üretmek için kısmi oksidasyon yoluyla biyogazdan üretilir. Sentez gazı, *Fischer-Tropsch* işlemiyle alkol, jet yakıtı, dizel ve benzin üretiminde kullanılır.

Bitkisel ve hayvansal üretim ve orman atıklarından üretilen biyogaz, çok fazla miktardaki biyokütleyi dönüştürerek iklim değişikliği, verimsiz atık yönetimi ve yenilenebilir enerji ihtiyacına yönelik stratejik ve çok işlevli bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Küresel tahminlerde, bu sektörler için her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton atık üretildiğini belirtilmektedir. Bu atıklar, anaerobik fermentasyon yoluyla işlenerek enerjiye ve biyogübreye dönüştürülebilmektedir. Bu dönüştürme işlemi, GHG emisyonlarını %90 düzeyine kadar azaltır (Uranga-Valencia ve Ark., 2025). Kırsal kalkınmayı teşvik eder, biyolojik çeşitliliği iyileştirir ve orman yangınları gibi çevresel riskleri önler. Ancak, yılda 8000 TWh olarak tahmin edilen yüksek küresel teknik potansiyeline rağmen, yüksek ilk yatırım maliyetleri, lignoselülozik atıklara göre düşük verimliliği ve özellikle mevcut biyokütlelerinin %5'inden azını kullanan ülkelerde zayıf düzenleyici yönetmelikler nedeniyle kullanımı sınırlı kalmaktadır. Buna karşılık, mikroalglerle ortak fermentasyon, entegre biyorafineriler ve yapay zeka gibi ortaya çıkan teknolojiler, bilim, teknoloji ve toplum katılımını birleştiren kapsamlı bir yaklaşım altında bu engellerin üstesinden gelmek için yeni yöntemler geliştirmektedir. Bu nedenle, biyogaz döngüsel, adil ve dayanıklı bir bioekonomi için temel bir sütun olarak konumlandırılmaktadır. Enerji güvenliğini teşvik etmektedir ve adil ve çevresel açıdan sorumlu bir geleceğe doğru ilerlemektir (Uranga-Valencia ve Ark., 2025).

İklim değişikliği ve çevresel kirliliğin zararlarının hissedildiği bir dünyada, neler olduğunu analiz etmek ve bu etkileri azaltmak için olası çözümler aramak zorunludur. Biyogaz üretimi, atık yönetimi için önemlidir ve doğrudan çevreyi ve halk sağlığını etkilediği için küresel bir zorluğu temsil etmektedir. Uygun yönetim kirliliği azaltacak, doğal kaynakları koruyacak ve küresel ısınmayı azaltarak gelecek nesiller için sürdürülebilir bir denge sağlayacaktır. Ancak, insanların hem bireysel hem de toplu olarak katı atıkları nasıl yönettiği ve günlük

yaşamlarımızda bunları azaltmak, geri dönüştürmek ve yeniden kullanmak için neler yapılabileceği konusunda farkındalığı artırarak başlamak gerekir.

Günümüzde insanların her yıl evlerden, işletmelerden, endüstrilerden, kurumlardan veya kamusal alanlardan 2,24 milyar ton katı atık ürettiği tahmin edilmektedir. Bu miktarın 931 milyon tonu sadece gıda atığıdır ve genellikle nehirlerle ve okyanuslara karışırken, sadece %55'i kontrollü tesislerde işlenmektedir (UN, 2023). Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın Küresel Atık Yönetimi Görünümü 2024 raporundan (UNEP, 2024) alınan verilere göre, kentsel katı atık üretiminin 2023 yılı için bildirilen yaklaşık 2,3 milyar tondan 2050 yılına kadar 3,8 milyar tona çıkması beklenmektedir.

Yukarıda belirtilen nedenlerden ve enerji krizi, verimsiz atık yönetimi ve iklim değişikliği nedeniyle acil çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Burada biyogaz sürdürülebilir ve verimli bir alternatif haline gelmiştir. Oksijen eksikliğinde organik maddenin anaerobik fermentasyonu ile üretilen bu yenilenebilir gaz, sadece atık ve kirletici emisyonların azaltılmasına katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda tarım ve ormancılık gibi stratejik sektörlerde ekonomik ve teknolojik gelişme için önemli bir fırsat sunar. Çünkü organik atıktan biyogaz üretimi, atık yönetimindeki küresel zorlukların ele alınması ve daha sürdürülebilir bir enerji modeline geçiş için çok yönlü bir yaklaşım sunar. Tarım ve ormancılık sektörlerinde her yıl yaklaşık 1,3 milyar ton katı organik atık üretildiği tahmin edilmektedir (FAO, 2023). Bu durum verimli kamu politikalarına olan ihtiyacı artırmakta ve yüksek ilk uygulama maliyetlerini azaltmaktadır. Bu uygulama biyokütlenin biyogaz ve biyogübreye dönüştürülmesi sadece çevresel etkiyi en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda kaynakların kullanımını optimize ederek daha sürdürülebilir tarım uygulamaları yoluyla biyolojik çeşitliliği ve toprak kalitesini artırır.

Öncelikle metan (CH_4) ve CO_2 'den oluşan biyogaz, önemli bir sömürü potansiyeline sahip yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Çok yönlülüğü, elektrik üretmek, ısıtmak, araçlara yakıt sağlamak ve hatta doğal gaz şebekelerine enjekte etmek için kullanılmasına olanak tanır.

Üretimi, ham maddelerin toplanması ve ön işlenmesi, anaerobik fermentasyon ve organik gübre olarak kullanılabilen besin açısından zengin bir yan ürün olan biyogaz ve fermentasyon atığının ayrılması gibi çeşitli aşamaları içerir. Bu süreçler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma ve iklim değişikliğini hafifletmedeki rolleri dikkate alındığında, bilim dünyasında ve enerji sektöründe giderek artan bir ilgi uyandırmıştır. Ancak, büyük ölçekli uygulamalarıyla ilgili zorluklar devam etmektedir. Anaerobik fermentasyon sürecinin verimliliği, kullanılan atığın değişkenliği ve çalışma koşulları gibi faktörler, biyogazın diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla ekonomik ve çevresel uygulanabilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle, geliştirilmesinin önündeki mevcut engelleri analiz etmek ve benimsenmesini kolaylaştıran yenilikçi çözümler belirlemek gerekir.

Bu bildiride, daha verimli atık yönetimine yönelik küresel ihtiyaç çerçevesinde düzenlenmiş olup, tarım ve ormancılık sektörlerinde biyogazın fırsatları ve sınırlamalarını değerlendirmektedir. Bu konuyu inceleyen çeşitli araştırma makalelerinin analizi yoluyla, pratik uygulaması için araçlar sunmak, üretimini ve yerel enerji sistemlerine entegrasyonunu optimize etmek için stratejiler önermek amaçlanmıştır. Sonuç olarak, biyogaz üretimi sadece atığı temiz bir enerji kaynağına dönüştürmekle kalmaz, aynı zamanda döngüsel ekonomide ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir bileşeni temsil eder. Çevresel sorunları sürdürülebilir çözümlere dönüştürme yeteneğiyle biyogaz, dayanıklı, erişilebilir ve daha çevre dostu bir geleceğe geçişte temel bir dayanak olarak kendini kanıtlamaktadır.

Biyogaz üretimi yoluyla organik tarım ve ormancılık atıklarının enerji kullanımı, 21. yüzyılın çevresel, sosyal ve ekonomik zorluklarını ele almak için stratejik ve çok yönlü bir yol sunmaktadır. Bu yaklaşım sadece iklim değişikliğini hafifletme konusundaki acil ihtiyaca yanıt vermekle kalmaz, aynı zamanda döngüsel ekonomi, ekolojik yenilenme ve kapsayıcı kırsal kalkınma ilkeleriyle de uyumludur. Bu bağlamda, biyogaz atıkla insan ilişkisini yeniden düşünmek ve çevresel yükümlülükleri enerji ve sosyal varlıklara dönüştürmek için somut bir araç olarak konumlandırılmıştır.

Bu teknolojiyi kamu politikalarına ve sürdürülebilir kalkınma gündemlerine entegre etmek bir enerji alternatifinden daha fazlasıdır; daha dayanıklı, eşitlikçi ve merkezi olmayan sistemler inşa etmek için gerçek bir fırsattır. Tarımsal üretim ve orman kalıntılarından üretilen biyogaz sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltır, tarım için temel besinleri geri kazandırır ve kırsal topluluklarda doğrudan ekonomik faydalar sağlar. Ayrıca, uygulanması uygun fiyatlı ve temiz enerji (SDG 7), iklim eylemi (SDG 13), sorumlu üretim ve tüketim (SDG 12) ve insana yakışır iş ve ekonomik büyüme (SDG 8) ile ilgili olanlar da dahil olmak üzere çeşitli *Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine* ulaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

Teknik bir bakış açısından, anaerobik fermentasyon olgun bir teknolojidir. Ancak optimum performansı, hammadde olarak kullanılacak materyallerin hassas karakterizasyonundan ve uygun sistem tasarımıyla çeşitli sosyo-çevresel bağlamlara uyum sağlama yeteneğine kadar değişen, birden fazla faktöre bağlıdır. Bu durum, yerel teknik kapasitelerin güçlendirilmesini, uygulamalı araştırmaların teşvik edilmesini ve toplum, endüstriyel ve hükümet paydaşlarını içeren katılımcı yönetim planlarının teşvik edilmesini gerektirir. Ancak, indirgemeci veya teknokratik görüşlerden kaçınmak çok önemlidir. Tarımsal üretim ve orman kalıntılarından üretilen biyoenerji mucizevi bir çözüm değildir. Ancak sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte gerçekçi ve gerekli bir alternatiftir. Uygun şekilde uygulanırsa, 2030 yılına kadar yılda 110 Mt düzeyine kadar CO₂'i azaltabileceği, kırsal istihdamı artırabileceği, yaşam kalitesini iyileştirebileceği ve üretim bölgelerinin enerji egemenliğini güçlendirebileceği tahmin edilmektedir.

Sonuç olarak, biyogazın gerçek potansiyelini ortaya çıkarmak, bilim, teknoloji, kamu politikaları, sosyal ekonomi ve çevresel adaleti bir araya getiren kapsamlı bir yaklaşım gerektirir. Sadece bilgilendirilmiş ve işbirlikçi kararlar yoluyla daha temiz, daha adil ve daha dayanıklı bir enerji matrisine doğru ilerlemek mümkün olacaktır. Böylece atık ve onu üreten bölgelerle olan ilişkimizi yeniden tanımlamamız gerekecektir.

KAYNAKLAR

EERA (2024) Bioenergy. RDI Gaps in Bioenergy, Biogas and Biofuels: Executive Summary. European Energy Research Alliance. 2024. Available online: <https://www.eera-bioenergy.eu/wp-content/uploads/2024/06/EERA-Bioenergy-RDI-Gaps-2024-Executive-Summary.pdf> (accessed on 21 May 2025).

Uranga-Valencia, L.P.; Pérez-Álvarez, S.; Gabriel-Parra, R.; Chávez-Medina, J.A.; Magallanes-Tapia, M.A.; Sánchez-Chávez, E.; Muñoz-Márquez, E.; García-García, S.A.; Rascón-Solano, J.; Castruita-Esparza, L.U. Biogas Production from Organic Waste in the Forestry and Agricultural Context: Challenges and Solutions for a Sustainable Future. *Energies* 2025, 18, 3174. <https://doi.org/10.3390/en18123174>.

Weldesemayat, G.; Barrios, E.; Lehmann, J.; Tubiello, F.N. An organic matter database (OMD): Consolidating global residue data from agriculture, fisheries, forestry and related industries. *Earth Syst. Sci.* 2025, 17, 369–3

BÖLÜM 4

SİLAJLIK MISIR SU VERİM İLİŞKİLERİ İLE TOPRAK FİZİKSEL VE HİDROLİK ÖZELLİKLERİNİN FARKLI TORAK İŞLEME YÖNTEMLERİNE GÖRE DEĞİŞİMLERİ¹

Mesut Cemal ADIGÜZEL
Prof. Dr. Üstün ŞAHİN
Dr. Zinnur GÖZÜBÜYÜK*

GİRİŞ

Küresel ısınmadaki artışlar, ekolojik dengenin bozulmaya başlaması ve artan nüfusa karşılık toprak ve su kaynaklarının yetersizliği gibi hususlar göz önüne alındığında, tarımda kısıtlı kaynaklarla daha fazla ve sağlıklı üretim sağlayacak yolların araştırılması ve geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu nedenle kit suyun rantabil kullanılması ve üretim girdilerinin düşürülmesi üzerinde önemle durulması gereken hususlardır.

Binlerce yıldan beri tarımı yapılan ve ana vatanı Amerika olan mısırın, buradan yayılarak dünyanın her yerinde yetiştirildiği bilinmektedir (Geçit vd., 2009). Dünya mısır üretiminin %27'si insanlar tarafından tüketilmekte, %73'lük kısmı da hayvan yemi olarak değerlendirilmektedir. Gelişmekte olan ülkeler mısırın %46'sını hayvan beslenmesinde, %54'ünü insan beslenmesinde ve sanayide hammadde olarak kullanmaktadır. Gelişmiş ülkelerde bu oran hayvan beslenmesinde %90, insan beslenmesinde ve sanayi hammaddesi olarak kullanımda %10 şeklindedir. Mısır, dünyada insan beslenmesinde günlük gerekli kaloringin %11'ini sağlamaktadır (Öz vd., 2017). Türkiye'de 2018 yılı verilerine göre 461 043,6 hektar alanda 23 197 563 ton mısır silajı elde edilmiştir. Erzurum ilinde de 2152,2 ha alanda 96817 ton mısır silajı üretimi gerçekleştirilmiştir (TÜİK 2019).

¹Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.

2018/2019 döneminde dünyada 191 190 000 hektar alanda 1 123 000 000 ton mısır elde edilmiştir (USDA, 2019).

Türkiye’de yıllık 574 mm yağışın su karşılığı 450 milyar m³ olup, kullanılabilir yüzey üstü su miktarı 94 milyar m³ ve yeraltı su miktarı 18 milyar m³’tür. Dolayısıyla kullanılabilir toplam 112 milyar m³ suyun kişi başına düşen miktarı yaklaşık 1350 m³/yıl’dır. Bu rakamlar Türkiye’yi su sıkıntısı çeken ülkeler sınıfına sokmuştur. Mevcut 112 milyar m³ suyun 40 milyar m³’ü sulama, 7 milyar m³’ü içme-kullanma ve 7 milyar m³’ü de sanayide kullanılmaktadır (DSİ, 2019).

Ülkemizde ve özellikle Doğu Anadolu Bölgesinde silajlık mısır üretiminin giderek artmasıyla anılan bitkinin su gereksinimindeki artışın yüksek olması üreticilerin gelecekte su kısıntısıyla karşı karşıya kalmalarını kaçınılmaz kılacaktır. Tarımsal amaçlı kullanılan su miktarı, ülkemizin yarı kurak iklim kuşağında bulunması, kullanımında tarım dışı sektörlerin etkinliğinin artması ve kalitenin de kirlilik baskısı altında bozulması sonucu günden güne azalmaktadır. Bu gelişmeler sürdürülebilir tarımsal üretim için temiz su kaynaklarının optimum kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Gençoğlu ve Yazar, 1999; Süzer, 2003).

Toprak işleme, bakım, sulama ve gübreleme tarımsal üretimde birbirini tamamlayan ve sonuçta yüksek kalite ve miktarda ürün elde edilebilmesini olanaklı kılan en önemli girdilerdir. Bu nedenle, mısır bitkisinden ekonomik verim elde etmek için toprakta bitkinin ihtiyaç duyduğu suyu en etkin kullanan, girdileri azaltan yeni toprak işleme–ekim uygulama yaklaşımlarının geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur.

Silajlık mısır Doğu Anadolu Bölgesinde hayvan yeşil yem ihtiyacını karşılamak için giderek yükselen bir oranda yetiştirilen önemli bir bitkidir. Bu çalışmada, yüksek rakımlı yarı kurak bir iklim bölgesinde geleneksel toprak işleme–ekim (GT) yöntemine alternatif uygulanabilecek koruyucu toprak işleme ekim yöntemleriyle (AT: Azaltılmış toprak işleme–ekim, DE: doğrudan ekim) silajlık mısırın üretim olanakları ve fiziksel–hidrolik toprak özellikleri üzerine etkiler araştırılmıştır.

Toprak fiziksel ve hidrolik özelliklerinden; kütle yoğunluğu, tane yoğunluğu, tarla kapasitesi, solma noktası, yarıyışlı su ve ıslak

agregat stabilitesi ile gözenek büyüklük dağılımında yöntemler arasında önemli farklılıklar tespit edilmemiştir. Optimum tohum yatağı için en uygun parçacık dağılımı (1–8 mm) AT yönteminde, yüksek porozite ve düşük penetrasyon direnci GT yönteminde, toprakta nem birikimi ile yüksek kararlı ve ortalama infiltrasyon hızları DE yönteminde belirlenmiştir.

Çimlenme–çıkış ve vejetatif gelişme açısından DE yöntemi en iyi sonuçları sağlamış, en az mevsimlik su tüketiminde 273.2 mm ile DE yöntemin de belirlenmiş, AT ve GT yöntemlerinde su tüketimleri sırasıyla 280.4 mm ve 290 mm olmuştur. Silajlık verim GT, AT ve DE yöntemlerinde sırasıyla 77.8, 76.9 ve 85.0 t/ha ve kuru madde verimleri de 15.4, 16.2 ve 18.3 t/ha'dır. Silajlık verime göre sulama suyu ve su kullanım etkileri DE yönteminde 0.50 ve 0.31 t/ha/mm olarak belirlenmiş, GT uygulamasından sırasıyla %8.4 ve %13.8 daha fazla olmuştur.

Bu sonuçlara göre DE yöntemi, yüksek rakımlı yarı kurak iklim koşullarda silajlık mısır üretiminde kısa süreçte infiltrasyonu ve toprak nem içeriğini geliştirerek daha az su tüketimiyle daha fazla verim elde edilme olanağı sağlayarak ve daha az toprak işlemeden kaynaklı üretim girdilerini de azaltarak ekonomik silajlık mısır yetiştiriciliğini mümkün kılacaktır.

1. Kaynak Özetleri

Artan çevre bilinci ve kaynakların ekonomik kullanımının gerekliliği, son yıllarda tarımda toprak işleme konusunda temel değişikliklerin meydana gelmesine neden olmuştur. Bu değişikliklere bağlı olarak geleneksel toprak işleme yerine koruyucu toprak işleme ve doğrudan ekim uygulamaları yaygınlaşmıştır.

Geçmişte 20. yüzyıl başlarına kadarki dönemde tohum yatağı hazırlanmasında toprağı yırtarak işleyen aletlerin daha çok kullanıldığı görülmektedir. Pulluk toprak işleme aleti olarak kullanılmaya başlaması ise 1. Dünya Savaşının sonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak 1950'li yıllarda, sınırlı kaynak toprağın pullukla aşırı işlenmesinin yapısında bozulmalara ve işlemenin daha fazla yoğunlaşmasıyla erozyon artışına, toprak neminde ve organik maddede azalmaya yol açtığı gözlenmiş, bu olumsuzlukları bertaraf

etmek için alternatif toprak işleme yöntemlerini geliştirme çalışmaları hızlanmıştır. Bu süreçte, bazı herbisitlerin de keşfiyle, 1960'lı yılların başında toprak işlemez tarım uygulamaya konulmuştur. Daha sonra uygun anıza ekim mibzerlerinin geliştirilip seri olarak üretilmesiyle, toprak işlemez tarım 1960'ların ikinci yarısından itibaren ABD, Brezilya, Arjantin, İngiltere gibi birçok ülkede özellikle ikinci ürün soya ve mısır üretim alanlarında başlamıştır (Anonymous, 1983).

Amerika kıtasının güney ve kuzey bölgeleri doğrudan ekim uygulamalarında %84.6'lık oranla dünyada ilk sıradadır. Anıza doğrudan ekim alanlarının toplam ekili alanlara oranı artışında Arjantin, Paraguay, Brezilya ve Kanada önde gelmektedir. Doğrudan ekim uygulamasının Finlandiya, Slovakya ve İspanya'da da giderek yaygınlaştığı, Finlandiya ve Slovakya'nın topraklarının %9.1'lik bölümünü doğrudan ekim yaparak işlediği, İspanya'da bu değerin %5.1, Yunanistan'da %3.7 olduğu ifade edilmiştir (Derpsch and Friedrich, 2009).

Koruyucu toprak işleme-ekim yöntemi; daha az müdahaleyle, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısını koruyarak üretim yapmayı amaçlar. Toprağı erozyondan korumak için yeteri kadar bitki kalıntılarının yüzeyde bırakıldığı bir uygulamadır. Geleneksel toprak işleme ise toprakların agregat stabilitesini düşürmekte, ekim derinliğinde makro poroziteyi artırırken, daha derin toprak tabakalarında ise poroziteyi azaltmakta, kütle yoğunluğunu artırmaktadır (Hermawan and Cameron, 1993).

Üretim maliyetlerinin azaltılması ve erozyon kontrolü gibi önemli gerekçelerle koruyucu toprak işleme-ekim yöntemleri geleneksel toprak işleme-ekim yöntemlerin yerini almaktadır. Geleneksel yöntemle tahıl üretiminde yakıtın %70'inin birincil ve ikincil toprak işlemede tüketilmesi, toprak nemindeki kayıp ve artan erozyon koruyucu toprak işleme eğilimini giderek hızlandırmıştır (Yalçın vd., 1997).

Derin toprak işleme, su ve bitki besin maddelerinin daha derin tabakalardan alınmasına yardımcı olacak bir köklenme sistemi sağlamasına rağmen geleneksel toprak işleme uygulamalarında artan tarla trafiği ve ağır makine-ekipmanları toprak sıkışmasına yol açarak infiltrasyonda infiltrasyonda bozulmalara, toprak organik

maddesinin hızlı tükenmesine neden olmakta, topraktaki mikrobiyal aktiviteyi ve bitki verimliliğini olumsuz etkileyerek toprak yapısında bozulmaları ortaya çıkarmaktadır. Toprak işleme ve kısıntılı su uygulamalarına bağlı yüksek penetrasyon direnci kök bölgesindeki havalanmayı azaltarak bitki gelişimini sınırlandırmaktadır (Gajri vd., 1994).

Tarımsal mekanizasyon ve toprak işleme yöntemlerinin toprak kalitesi ve çevreye etkisi konusunda çok sayıda araştırmalar yürütülmüştür. Toprağın üretim kapasitesiyle ilgili kalitesini değerlendirmek için organik madde içeriği, infiltrasyon hızı, agregasyon, pH, kütle yoğunluğu ve tuzluluk gibi göstergeler kullanılabilmektedir (Astier–Calderon vd., 2002).

Toprak işlemede sürekli doğrudan ekim yönteminin kullanımı toprakların hidrolojik, mekanik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerde ölçülebilir değişikliklere neden olabilmektedir (Lal and Elder, 2008).

Kütle yoğunluğu değerleri toprak işleme yöntemlerinin toprak özellikleri üzerine etkilerini ortaya koymak için yaygın olarak kullanılan bir kalite göstergesidir. Karlen (2004)'e göre topraklarda daha yüksek kütle yoğunluğu değerleri daha yüksek bir sıkıştırma seviyesini göstermektedir. Roscoe and Burman (2003)'de kütle yoğunluğu değerlerinin yüksek olmasının toprakta sıkışmayı gösterdiğini ve bu değerlerin geleneksel toprak işleme–ekim yönteminin uygulandığı alanlarda, doğrudan ekim yapılan alanlara göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Birkas vd. (2004)'de pulluk ve diskli aletler ile yapılan düzenli derin toprak işlemenin ilk üç yılda üst toprak katmanlarında sıkışmalara neden olduğunu ve beş yılın sonunda sıkışmanın alt tabakalarda da görüldüğünü ortaya koymuşlardır.

Birçok araştırmacı topraktaki organik madde miktarının yüksekliği ile verim arasında ilişkinin önemine değinmişler ve toprağın organik madde içeriğinin bir kalite göstergesi olduğunu belirtmişlerdir. Penetrometre direnci ve kütle yoğunluğunun, toprak sıkışıklığının bir göstergesi olduğu, bitki köklerinin yüksek dirence sahip toprak katmanlarından olumsuz etkilendiği görülmüştür. Zemin sıkışıklığındaki olası bir artış, kök uzamasını ve köklerin derinlerine

nüfuz etmesini engellemektedir. İdealden daha yüksek penetrasyon direnci daha yüksek bir sıkıştırma seviyesini gösterir ki bu da bitki gelişimini olumsuz etkilemektedir (Hall and Raper, 2005).

Geleneksel toprak işleme, büyüme mevsimi boyunca toprağın fiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Birbirini takip eden toprak işleme uygulamalarında fazla makina kullanımı alt toprak katmanlarında sıkışmaya ve taban taşı oluşumuna sebep olur ve bu katman toprağa uygulanan suyun derine sızmasını engelleyerek, bitki gelişimini olumsuz etkileyebilir (Singh vd., 2009). Fransa’da geleneksel toprak işleme yapılan bir deneme, kütle yoğunluğunun %15–20 civarında arttığı, toprağın hidrolik iletkenlik değerinin de kütle yoğunluğunun tersine azaldığını ortaya konmuştur. Oysa toprak işlemesiz koşullarda bu bozulmanın birkaç yıl aldığı tespit edilmiştir. Kanada da toprak işlemesiz ekim yapılan siltli killi topraklarda 11 yılın sonunda kütle yoğunluğunda sadece %10’luk bir değişimim olduğu ortaya konmuştur (Dam vd., 2005).

Azaltılmış toprak işleme ve doğrudan ekim sistemlerinin çevresel üstünlüğü yanında, ekonomik üstünlükleri de bu sistemlerin yaygınlaşmasında önemli bir etken olmuştur. Bunların başında insan iş gücü ihtiyacını %50’ye kadar azaltması, zaman, yakıt ve makina girdi maliyetlerinden tasarruf sağlamasıdır (Crabtree, 2010).

İkinci ürün tane mısır yetiştiriciliğinde geleneksel, azaltılmış toprak işleme ve toprak işlemesiz tarım yöntemlerinin kullanıldığı bir çalışmada geleneksel yöntemle göre, diğer iki yöntemin daha ekonomik olduğu belirlenmiş ve yöntemlerin birim alana yakıt tüketimleri sırası ile 25, 18 ve 7 l/ha olarak belirlenmiştir (Zeren vd., 1993).

Gözübüyük vd. (2018) Erzurum yöresinde sulu ve kuru tarım koşullarında yapmış oldukları çalışmada, geleneksel toprak işleme–ekim yönteminde bir hektar alanın işlenmesi ve ekimi için 8.13 h makina ve 9.74 h insan işgücüne ihtiyaç olduğunu, anıza doğrudan ekim yönteminde ise bu işlemlerin 1.63 h makine ve 3.48 h insan işgücü ile yapılabileceğini, ayrıca anıza doğrudan ekim yönteminde, geleneksel toprak işleme–ekim yönteminde tüketilen toplam yakıtın %21’inin tüketildiğini belirtmişlerdir.

Geleneksel toprak işleme uygulamaları; toprağın su tutma kapasitesi ve suyun hareket edebilme potansiyeli ile toprakta organik madde azalması, mikrobiyal aktivite ve verimliliği olumsuz etkileyen yapısal bozulmasına yol açmaktadır (Ramos vd., 2011).

Anızın yakılması organik madde miktarında azalmaya neden olmakta, toprakların fiziksel bakımından kırılgan bir yapıya sahip olmalarına yol açmaktadır. Bununla birlikte, toprak işlemez uygulamalar yardımıyla, bitkisel atık yönetimi ile bu sorunu büyük ölçüde çözülebilmektedir (Afzalnia and Zabihi, 2014).

Bitkisel üretimde toprak işlemenin amacı, çimlenme ve bitki gelişimi amacıyla fiziksel koşulları uygun hale getirip, optimum tohum yatağı hazırlamaktır. Yoğun işlenen topraklarda kademeli olarak agregasyondaki zayıflama ile birlikte hem toprağın su tutma kapasitesinde azalmalar ve hem de erozyona maruz kalma durumu ortaya çıkarmaktadır (Alletto vd., 2015).

Enerji tasarrufu ve toprak erozyonunun azaltılması nedeniyle artan kârlılık ve çevresel katkı, dünyanın birçok yerinde azaltılmış toprak işleme uygulamalarının kullanılmasına ilgiyi artırmıştır. Toprak işlemenin azaltılması ile maliyetlerinin düşmesinin yanında toprak suyunun buharlaşmasındaki azalma da azaltılmış toprak işleme uygulamaların yaygınlaşmasına katkı sağlamıştır. Geleneksel toprak işleme yöntemi sadece yüksek bir enerji girdisine ihtiyaç duymaz, aynı zamanda toprağın yapısının bozulmasına neden olur. Bu sınırlamalar göz önüne alındığında, azaltılmış toprak işleme uygulamalarının ürün verimi üzerinde etkili olup olmadığı ortaya konulmalıdır (Kahlon and Khurana, 2017).

Çakır vd. (2003), buğday üretiminde doğrudan ekim ve geleneksel toprak işleme yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Geleneksel toprak işlemede; çizel, diskaro, sürgü ve ekim makinası, doğrudan ekimde ise anıza ekim yapabilen makina kullanmışlardır. Doğrudan ekimde geleneksel uygulamaya göre %13 daha fazla verim elde etmişlerdir.

Thomas vd. (1996) buğday yetiştiriciliğinde uyguladıkları sıfır toprak işlemede toprakta daha fazla su depolanmasının sağlandığını ve bunun da kuru madde veriminde ve su kullanımında artışa sebep

olduğunu, ancak buğday tane veriminde geleneksel toprak işlemeye göre ciddi bir farkın olmadığını belirlemişlerdir.

2006 yılında Çukurova Bölgesi'nde buğday sonrası ikinci ürün silajlık mısırdaki yapılan bir çalışmada, azaltılmış toprak işleme, bantvari toprak işleme, sırta ekim ve doğrudan ekim yöntemleri, geleneksel toprak işleme-ekim yöntemi ile teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılmıştır. En yüksek mısır silaj verimi azaltılmış toprak işleme yönteminden, en düşük verim ise bantvari toprak işleme yönteminden elde edilmiştir. Yöntemler arasında en düşük yakıt tüketimi ve en yüksek iş verimi doğrudan ekim yönteminde belirlenmiştir. Böylece doğrudan ekim yöntemi yakıt tüketimi, zaman ve iş verimi açısından diğer yöntemlere göre önemli miktarda tasarruf sağlanmıştır (Karaağaç, 2007).

Bayhan vd. (2006) Trakya bölgesinde ikinci ürün silajlık mısırdaki beş farklı toprak işleme yöntemi ile doğrudan ekim yöntemi verim, yakıt tüketimi ve güç gereksinimi açısından karşılaştırmışlar, doğrudan ekimin diğer uygulamalara göre en iyi sonuçları verdiğini belirtmişler ve bölgede ikinci ürün silajlık mısır için azaltılmış toprak işleme ve doğrudan ekim yöntemini önermişlerdir.

Karaağaç ve Barut (2009) Çukurova'da ikinci ürün silajlık mısırdaki geleneksel ve koruyucu toprak işlemeli üretim yöntemlerinin bitki gelişimi ve işletme ekonomisine etkilerini karşılaştırmışlardır. Geleneksel, şeritvari, azaltılmış, sırta ekim ve toprak işlemesiz yöntemleri arasında en yüksek silaj verimi azaltılmış toprak işleme yönteminden, en düşük verim ise şeritvari toprak işleme yönteminden elde etmişlerdir.

Ülkemizin güneyinde yer alan yarı kurak bölgelerde, toprak organik madde içeriği anız yakma ve yoğun toprak işleme uygulamaları nedeniyle diğer bölgelere oranla daha düşük bulunmuştur. Bu bölgelerde toprak işleme yöntemleri ile toprak özellikleri arasındaki ilişki çalışılmış olmasına rağmen, araştırmacılar toprak işleme yöntemine bağlı toprak yapısındaki değişimi ortaya koyamamışlardır (Barut ve Çelik, 2017).

Sulama, modern tarımın ayrılmaz bir parçasıdır ve bitkisel üretimde en önemli tarımsal girdilerden birini oluşturmaktadır. Ancak topraktaki suyun etkisi kullanım yollarının geliştirilmesi kadar

sulamanın zamanlaması da önemlidir (Yıldırım, 1993). Doorenbos and Kassam (1979) mısır bitkisinin toprakların kullanılabilir su tutma kapasitesinin %55'nin tüketildiğinde sulanması halinde iyi bir verim elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Patel vd., (1985) ise yapmış oldukları çalışmada, mısır bitkisinde en yüksek dane verimini topraktaki yarayışlı suyun %25 tüketildikten sonra sulamanın uygulandığı konudan elde etmişlerdir.

Mısırdaki erken gelişme dönemlerinde bitkide solgunluk belirtileri görülmeye başladığında yaklaşık 15–20 gün aralarla 2–3 sulama yapılabilir. Sulama aralığının hesaplanmasında ölçü, topraktaki nemin solma noktasına inmemesi ve genellikle topraktaki yarayışlı su %50'ye düştüğünde su verilmesidir (Gençoğlu ve Yazar, 1996).

Stegman (1986) yarı nemli iklim bölgesindeki farklı toprak bünyesine sahip olan iki ayrı alanda mısır bitkisinin su–verim ilişkilerini araştırmış ve mevsimlik sulama suyundan kaba bünyeli toprakta %23, orta bünyeli toprakta ise %30 düzeyinde bir kısıntı yapılması halinde verimde %5 civarında bir azalma olduğunu saptamıştır.

Lopez vd. (1996) İspanya'nın 300–600 mm arası yağış alan dört farklı bölgesinde geleneksel, azaltılmış ve sıfır toprak işlemenin, toprak su tutma kapasitesi ile penetrasyon direncine etkisini incelemişlerdir. Deneme süresince geleneksel ve azaltılmış toprak işleme uygulamalarının, topraktaki nem birikimine etkilerinin birbirine yakın olduğu belirlenirken, sıfır toprak işlemenin etkisinin değişken olduğunu saptamışlardır. Bu alanlarda azaltılmış toprak işlemenin, toprak nemi ve penetrasyon direncine olumsuz etki yapmadığı, bu uygulamanın geleneksel toprak işlemenin yerini alabileceğini ortaya koymuşlardır.

Moraes and Benez (1996) beş farklı toprak işleme yönteminin toprakların fiziksel özelliklerine, mısır tane verimlerine etkisi araştırılmış, üst toprağı işleyen sistemlerin makro porozite ve toplam poroziteyi arttırıp, mikro poroziteyi azalttığını ve alt topraktaki penetrasyon direncinin toprak işleme sistemlerinden önemli şekilde etkilendiğini belirlemişlerdir. Ancak araştırmacılar toprak işleme ve ekim yöntemleri farklılıklarının hacim ağırlığı ve hidrolik iletkenlik değerlerine önemli etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Bayrak (1997) sulama zamanı için bitki boyu 40–45 cm olunca birinci su, tepe püskülünde ikinci su, koçan oluşumu döneminde üçüncü su ve süt oluşumunda da dördüncü su önerisinde bulunmuş ve her sulamada verilecek suyu 100 mm olarak belirlemiştir.

Tariq vd. (2003) Pakistan’da farklı bitki kap katsayısıyla (kcp) yapmış oldukları çalışmada, mısır bitkisinde en yüksek verimi kcp: 0.75 konusundan elde etmişlerdir. El–Tantawy vd. (2007) mısır’da en yüksek verimi kcp: 1.0 ve 1.20 olan sulama konusundan elde etmişlerdir. Kızıloğlu vd. (2009)’da yarı kurak serin iklim koşullarında silajlık mısırdaki su verim ilişkileri, su kullanım etkinliği ile bitki ve pan katsayılarını belirlemek amacıyla yürüttükleri iki yıllık bir araştırma sonucunda; silajlık mısır için kcp katsayısı ilk yıl 0.84 ve ikinci yıl 1.01 olarak belirlemiştir. Bu sonuçlar mısır su tüketiminde iklim koşullarının farklı etkilerinin değerlendirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Uzun süreli toprak işleme uygulamalarının mısır verimine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, doğrudan ekim uygulamasının siltli tın ve tınlı kum topraklarda daha iyi sonuçlar sağladığı ifade edilmiştir (Nunes vd., 2018).

Hernández vd. (2019) yaptığı çalışmada doğrudan ekim yönteminde tutulan suyun fazlalığının daha yüksek poroziteden kaynaklandığını, su iletimi sağlayan porlarda düşük değişimler olduğunu bununda yüksek kütle yoğunluğundan kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Gholami vd. (2014) üç farklı toprak işleme uygulamasının (doğrudan ekim, azaltılmış ve geleneksel toprak işleme) hacim ağırlığı, porozite ve nem içeriğinde önemli değişimler oluşturabildiğini, doğrudan ekimden geleneksele doğru hacim ağırlığının 1.41 g/cm³’ten ile 1,29 g/cm³’e düştüğünü, poroziteninde %47.6’dan %52.5’e arttığını bildirmişlerdir.

Idowu vd. (2014) kısa süreli koruyucu toprak işleme uygulamalarının silajlık mısır verimi ve toprak kalitesi üzerine etkileri konusunda yaptıkları çalışmada, fiziksel özellikler üzerine önemli etkiler belirleyememiş, koruyucu toprak işleme uygulamasının toprak kalitesini koruyarak sürdürülebilir silajlık mısır üretimi sağlayabileceğini bildirmişlerdir.

Ren vd. (2019) mısır yetiştirme sezonunda yoğun işlemeye göre azaltılmış işlemede toprak nem içeriğini daha yüksek belirlemiş, mısır veriminde artış trendinin olduğunu ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Araştırma yerinin tanımı

Bu araştırma, Erzurum ili Pasinler İlçesindeki Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü'ne bağlı, Pasinler Araştırma İstasyonunda yürütülmüştür. Pasinler Ovası 39°51'–40°10' kuzey enlemleri ile 41°35'–42°10' doğu boylamları arasında, Yukarı Aras Havzası içerisinde yer almaktadır. Uzunluğu 33 km, genişliği ise 7–10 km arasında değişmektedir ve oldukça yüksek bir rakıma (1800 m) sahiptir. Pasinler Ovası batı, kuzey ve güneyden yer yer 3000 metreyi aşan dağ silsileleri ile çevrilmiştir (Gözübüyük, 2016).

3.2. Araştırma yerinin iklim özellikleri

Denemenin yürütüldüğü Pasinler ovasında tipik karasal iklim görülmektedir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar uzun ve sert geçmektedir. Gece ile gündüz sıcaklık farkı fazladır, yıllık yağış miktarı 404.5 mm'dir. Uzun yıllar ortalaması baz alındığında en fazla yağış 60.5 mm ile Mayıs ayında, en düşük yağış ise 13.1 mm ile Ağustos ayında görülmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 6.5 °C olup, en düşük sıcaklık değeri -9.9 °C ile Ocak ayında, en yüksek sıcaklık ise 20.6 °C ile Ağustos ayında saptanmıştır (DATAE, 2015).

3.3. Araştırma yerinin toprak özellikleri

Topraklar organik maddece fakir, kireç bakımından zengindir. Bünye genellikle ağırdır, ancak birikme alanının akarsu taşıma bölgesine yakın alanlarda toprak bünyesi kabadır. Toprakların pH değerleri 7.5–8.1 ve tuzluluğu da %0.040–0.053 arasında değişmektedir. Fosfor ve organik madde içeriği yönünden fakir, potasyum miktarı bakımından zengin içeriğe sahiptirler (Gözübüyük 2016). Araştırmanın yürütüldüğü topraklar ovanın genelini temsil edecek karakterde, kumlu–killi–tın bünyeye sahiptirler, hafif bazik reaksiyonda ve kireçlidirler.

3.4. Deneme deseni

Deneme, tam şansa bağlı tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekrarlı olarak yürütülmüş, deneme konularını;

GT: Geleneksel toprak işleme (pulluk + diskli tırmık + kombikürüm + ekim makinası),

AT: Azaltılmış toprak işleme (dik rötovatör + ekim makinası),

DE: Doğrudan ekim (doğrudan ekim makinası) olmak üzere üç toprak işleme–ekim yöntemi oluşturmuştur.

3.5. Sulama sistemi ve sulama suyu uygulamaları

Sulama yüzey üstü damla sulama yöntemiyle yapılmıştır. Damla sulama sistemi; pompa, hidrosiklon, gübre tankı, elek filtre, manometreler, basınç düzenleyici, ana vana, her parsel için kontrol vanaları, su sayaçları, manifold boru hatları ve 20 cm aralıklı in-line damlatıcılı (4 l/h) lateral hatlardan oluşmuştur. Her iki bitki sırasına bir olacak şekilde lateraller 140 cm (doğrudan ekimde 152 cm) aralıkla yerleştirilmiştir.

Sulamaya bitkiler 6–8 yapraklı olduğunda 24 Temmuz'da başlanmıştır. Sulamalar topraktaki yarayışlı suyun yaklaşık %50'si tüketildiğinde %65 ıslatma yüzdesi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sulama suyu hesabında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır. Sulama suyu uygulamaları koçan püskülünün tamamen kuruyup, danenin hamur olum dönemi başlangıcı (27 Ağustos) kadar sürdürülmüştür (Kanber, 1999). Sulama suyu hesabında etkili kök derinliği 90 cm alınmıştır (Güngör vd., 1996).

$$I = (TK - MN) \times \gamma_s \times D \times P/100$$

Eşitlikte; I: sulama suyu miktarı (mm), TK: tarla kapasitesinde tutulan nem (%Pw), MN: mevcut nem (%Pw), γ_s : kütle yoğunluğu (g/cm³), D: etkili kök derinliği (mm) ve P: ıslatma oranı (%)'dir.

3.6. Bitki su tüketimlerinin belirlenmesi

Bitki gerçek su tüketimi su bütçesi yöntemine göre aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Jensen vd.,1990).

$$ET_a = I + P + C_r - D_w - R_f \pm \Delta S$$

Eşitlikte; ET_a : gerçek bitki su tüketimi (mm), I : uygulanan sulama suyu miktarı (mm), P : yağış miktarı (mm), C_r : kapılar yükselme (mm), D_w : kök bölgesinden drene olan su miktarını (mm), R_f : yüzey akışı (mm) ve ΔS : toprağın nem içeriğindeki değişim (mm)'dir.

3.7. Sulama suyu (IWUE) ve su kullanım (WUE) etkinlikleri

Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) ve su kullanım etkinliği (WUE) için Howell vd. (1990) tarafından önerilen eşitliklerden yararlanılmıştır.

3.8. Toprak analizleri

Fiziksel–hidrolik ve kimyasal analizler

Bozulmamış ve bozulmuş toprak örneklerinde fiziksel–hidrolik özelliklerden dane büyüklük dağılımı, kütle yoğunluğu, tane yoğunluğu, porozite, tarla kapasitesinde tutulan nem, solma noktasında tutulan nem, yarayışlı su, ıslak agregat stabilitesi ve gözenek büyüklük dağılımı Klute (1986)'deki yöntemlerle belirlenmiştir.

İnfiltrasyon ölçümleri

Deneme parsellerinde değişken seviyeli çift silindirli infiltrometre ile infiltrasyon ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen değerlerden regresyon modeli yaklaşımıyla infiltrasyon hızı ve ortalama infiltrasyon hızı eşitlikleri çıkarılmıştır (Delibaş 1994).

Toprak penetrasyon direnci

Toprak penetrasyon direnci koni uç açısı 60° olan penetrometre ile belirlenmiştir (Şekil 3.10). Penetrasyon ölçümleri toprak işleme öncesinde ve sonrasında 10 cm'lik aralıklarla 30 cm derinliğe kadar yapılmıştır. Ölçme hassasiyeti %1 olup, her parselden 3 tekerrürlü ve 3 cm/s batma hızı baz alınarak toprağa batırılmaya çalışılmış ve batma ucuna düşey yönde etki eden direnç ölçülmüştür (Bradford, 1986).

Toprak parçacık boyut dağılımı

Toprak işleme uygulamasından sonra her parselin etkili çalışma derinliğinden 3 kg kadar alınan toprak örnekleri, laboratuvarında 1.5 ay kurutulmaya bırakılmıştır. Kasnak çapı 200 mm olan 1, 2, 4, 8, 16, 32, 63 mm'lik delik çaplarına sahip, kare delikli elekler kullanılarak (Eghball vd. 1993), titreşim frekansı 50 Hz ve eleme süresi 30 s olarak belirlenen (Çelik, 1998) RETSCH marka mekanik sarsıcı yardımıyla toprak örnekleri 8 ayrı fraksiyona ayrılmıştır. Eleme sonrası elekler üzerinde kalan toprak miktarı, dijital göstergeli, 4 000 g ölçüm kapasiteli ve 1/100 g hassasiyetindeki terazi ile tartılarak her fraksiyonun örnek toplamına göre % miktarı belirlenmiştir.

Gözenek büyüklük dağılımı

Gözenek büyüklük dağılımının belirlenmesinde deneysel olarak elde edilmiş pF eğrileri kullanılmıştır. pF eğrileri 0.01, 0.1, 1, 0.33 ve 15 atm'lik tansiyonlarda tutulan hacim yüzdesi nem miktarları ile porozite değerleri dikkate alınarak çıkarılmıştır (Demiralay, 1993).

Genel olarak topraklarda, ekosisteme gaz geçişlerini ve yüksek infiltrasyon hızlarını sağlayan 100 μ 'dan büyük gözenekler drenaj ve havalanma gözeneklerini (makropor), 100–30 μ arası gözenekler toprakta suyun tutulmasını ve hızlı iletimini sağlayan orta gözenekleri (mezopor), 30–3 μ arası gözenekler su tutmaya yarayan küçük gözenekleri (mikropor) ve <3 μ olan gözeneklerde bitkiler için yararlısız suyun tutulduğu çok küçük gözenekleri (ultramikropor) oluşturmaktadır (Jigau, 2010; Şahin and Anapalı, 2006).

3.9. Bitki gelişim parametreleri

Çimlenme ve çıkışların değerlendirilmesinde tarla filizi çıkışı, tarla filizi çıkış derecesi ve ortalama çimlenme süresi dikkate alınmıştır. Ekimden 9 gün sonra her parselden üç tekerrürlü olarak üçer gün arayla çimlenen bitkilerin sayımları yapılmıştır. Sayımla elde edilen değerlerden tarla filizi çıkışı (TFÇ; adet/m²), tarla filizi çıkış derecesi (TFÇD) ve ortalama çıkış süresi (OÇS) (Çarman, 1994; Mohanty and Painuli, 2004).

3.10. Verim

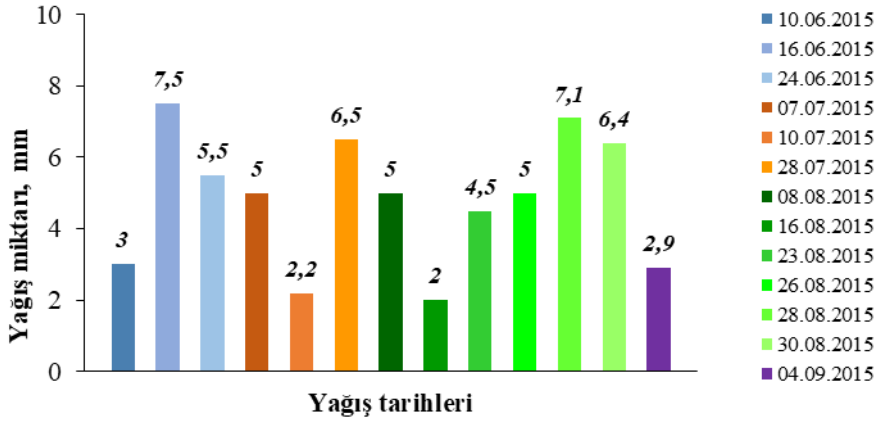
Bitkilerin gelişme ve verim özellikleri ile ilgili işlemler Aslangiray vd. (1991), Gül ve Başbağ (1999)'da belirtilen yöntemlerle yapılmıştır. Hasatta her parselin orta sıralarından rastgele 10 bitki alınarak boyları ve gövde çapları ölçülüp, koçanları sayılmış, ayrı ayrı yaprak, koçan ve sap ağırlıkları ile toplam ağırlıkları belirlenmiştir. Toplam ağırlıktan silajlık verim, yaprak, koçan, sap ağırlıklarının toplam ağırlığa oranlanmasıyla da yaprak, sap ve koçan oranları belirlenmiştir. Ölçümlerde ilk boğum uzunluğu ve ilk koçan yükseklikleri de kayıt altına alınmıştır.

Ayrıca hasattan sonra parsellerden alınan bitki örnekleri önce açık havada daha sonra 65 °C'ye ayarlı kurutma fırınında 48 saat kurutularak belirlenen kuru ağırlıklar yaş ağırlıklarına oranlanarak kuru madde oranları da belirlenmiş, yaş verimler bu oransal değerle çarpılarak kuru madde verimleri hesaplanmıştır.

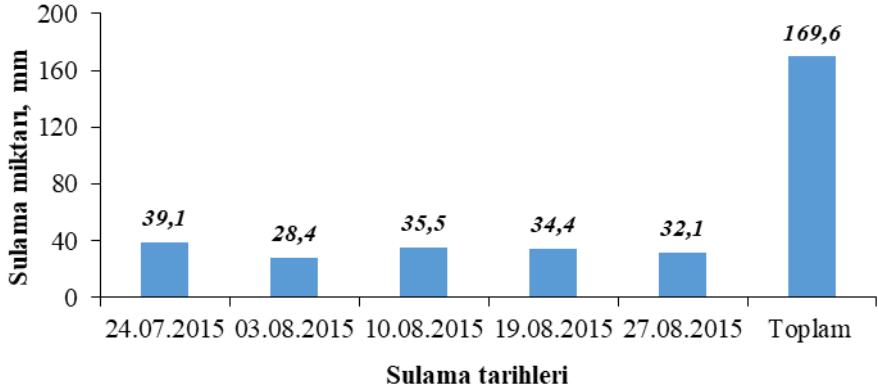
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Yağış, Sulama Miktarı ve Bitki Su Tüketimi

Deneme yılında ekim tarihinden 8 gün sonra başlayan yağışlar (10 Haziran), hasat tarihinden 13 gün (4 Eylül) öncesine kadar devam etmiştir. 13 farklı günde toplam 62.6 mm yağış düşmüştür (Şekil 4.1). Sulamalar 24 Temmuz'da başlatılmış, koçan püskülünün tamamen kuruyup danenin hamur olum dönemine geçişine kadar sürdürülmüş (27 Ağustos), bu dönemde 5 sulamada toplam 169.6 mm sulama suyu uygulanmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Silajlık mısırın yetiştirme periyodunda gerçekleşen yağışlar

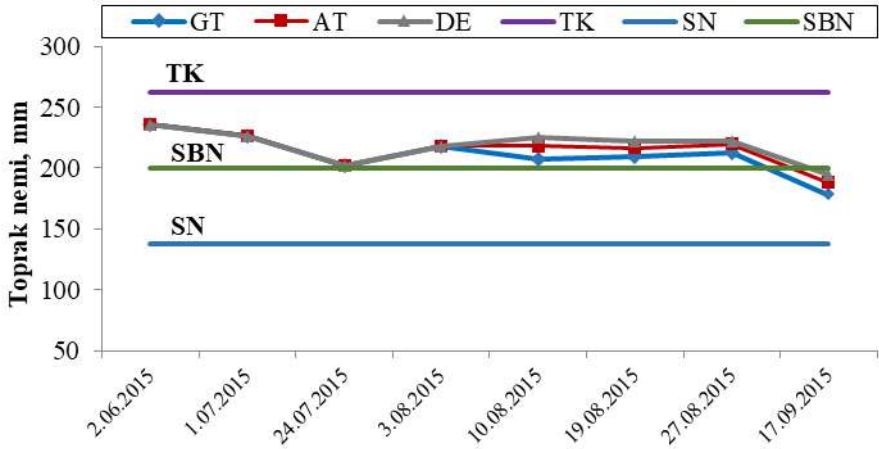


Şekil 4.2. Silajlık mısırın yetiştirme periyodunda uygulanan sulama miktarları

4.2. Toprak nem değişimi

Sezon başında sulamaya başlama seviyesinin (yarayışlı suyun %50'si) üzerinde olan mevcut toprak nemleri sezon boyunca bu seviyenin altına inmemiş, hasada yakın sulamanın kesilmesi ve yağışında yetersizliğine bağlı olarak kısmi azalış eğilimi göstermiştir. İkinci sulamadan sonra toprak işleme-ekim yöntemleri arasında nem içeriklerinde farklılıklar ortaya çıkmış, farklılıklar hasada kadar sürmüş, doğrudan ekim yöntemi en fazla, geleneksel yöntem en az nemi sağlamıştır. Sezon sonu nemi dikkate alındığında DE ve AT

yöntemleri GT' ye göre sırasıyla 1.4 mm ve 0.8 mm daha fazla toprak nemi sağlamıştır (Şekil 4.3). Koruyucu toprak işleme yöntemlerinin nemi koruyarak toprakta daha fazla su kalmasına neden olduğu önceki birçok çalışmada da belirlenmiştir (Gözübüyük vd., 2015; Gözübüyük vd., 2014).

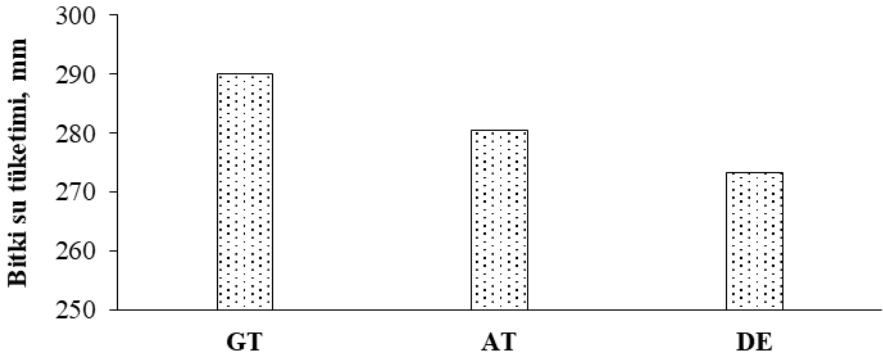


Şekil 4.3. Toprak nem değişimleri

4.3. Bitki su tüketimi

Silajlık mısır bitkisinin su bütçesi yöntemine göre hesaplanmış sezonluk su tüketim değerleri verilmiştir. En düşük su tüketiminin belirlendiği DE yöntemi (273.2 mm), GT (290 mm) ve AT (280.4 mm) yöntemlerine göre sırasıyla %5.8 ve %2.6 daha az su tüketimi sağlamıştır (Şekil 4.4). Kızıloğlu vd. (2009), Erzurum'da tam sulanan konuda 688.4 mm sulanmayan konuda ise 197.8 mm; Dağdelen vd. (2009), Aydın ilinde silaj mısır için tam sulanan konuda 695 mm sulanmayan konuda ise 92.3 mm; Gençdoğan ve Yazar (1999), Çukurova bölgesinde mısır için tam sulanan konuda 1 026 mm sulanmayan konuda ise 410 mm; Arıtürk ve Erdem (2011), Tekirdağ koşullarında İkinci ürün silajlık mısırın (*Zea Mays L.*) sulama zaman ve su-verim-kalite ilişkilerinin belirlenmesi amacıyla yürüttükleri bir araştırmada, mevsimlik bitki su tüketimi değerlerinin karık sulama yönteminde 506 mm, damla sulama yönteminde 429 mm; Karasu ve

ark. (2015); Marmara bölgesinde yürüttükleri bir çalışmada; damla sulama yöntemi kullanarak sulama yaptıkları silajlık mısırın sezonluk su tüketimi 826 mm, sulama suyu kullanım etkinliğini de 1.32 kg/m³; olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada su tüketimlerinin genel olarak düşük belirlenmiş olması damla sulama koşullarında 1'den düşük sulama oranıyla sulamaların gerçekleştirilmiş olmasıyla açıklanabilir. Yine doğrudan ekim yönteminin toprakta nem depolanmasını artırarak ve buharlaşma kayıplarını da azaltarak daha az su tüketimine sebep olduğu ifade edilebilir. Gözübüyük vd. (2015) anıza doğrudan ekimde toprak yüzeyindeki bitki artıklarının buharlaşmayı azalttığı aynı zamanda kar ve yağmur suyunu da tutarak toprakta daha fazla nem birikimini sağladığını belirlemişlerdir.



Şekil 4.4. Mevsimlik su tüketimi değerleri

4.4. Toprak işleme–ekim yöntemlerinde hasat sonrası kütle yoğunluğu, tane yoğunluğu ve toplam porozite değerleri

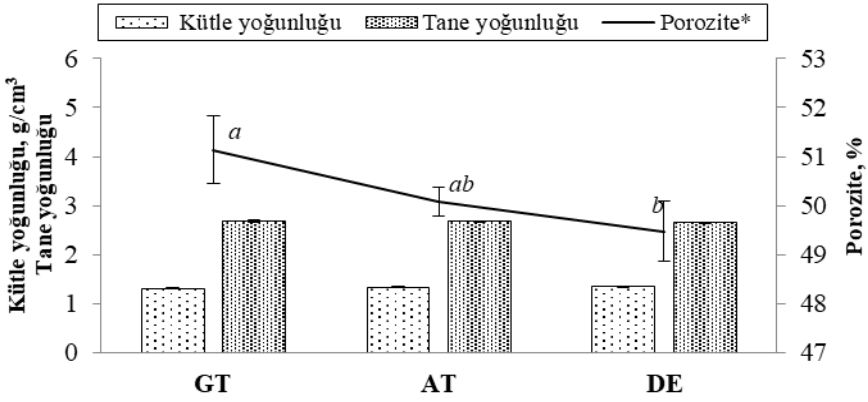
Hasat sonrası parsellerin yüzey tabakasından (0–30 cm) alınan bozulmuş ve bozulmamış toprak örneklerinde belirlenen; kütle yoğunluğu, tane yoğunluğu ve toplam porozite değerleri varyans analizi sonuçları; farklı toprak işleme–ekim yöntemlerinin kütle ve tane yoğunluğuna etkisinin olmadığı, poroziteyi ise önemli düzeyde ($P<0.05$) değiştirdiği belirlenmiştir (Şekil 4.5).

Moraes and Benez (1996) doğrudan ekim yönteminin makro porozite ve toplam poroziteyi artırıp, mikro poroziteyi azalttığını ve alt topraktaki penetrasyon direncinin toprak işleme sistemlerinden

önemli şekilde etkilendiğini belirlemişlerdir. Doğrudan ekimde toprak işlemenin olmayışının kütle yoğunluğunu artırdığı kısmen artan organik maddenin de tane yoğunluğunu düşürdüğü bilinmektedir (Şeker ve Işıldar, 2000). McVay vd. (2006), 5 farklı bölgede ve siltli tın topraklarda 23 yıl boyunca sürdürdükleri araştırmalarında kütle yoğunluğunun, anıza doğrudan ekim yöntemi için 1.25–1.40 g/cm³, geleneksel toprak işleme için 1.11–1.22 g/cm³ ve azaltılmış toprak işleme için 1.20–1.33 g/cm³ arasında değişim gösterdiğini belirtmişlerdir. Zhang and Fang (2007) yaptıkları bir çalışmada toprak işleme derinliğindeki artışın toprağın kütle yoğunluğunu önemli derecede düşürdüğünü bildirmişlerdir.

Yapılan bazı çalışmalarda doğrudan ekimin aşırı toprak sıkışmasına neden olduğu (Tebrügge and Düring, 1999; Oliver vd., 2002; Fabrizzi vd., 2005), bazılarında ise olmadığı bildirilmiştir (Logsdon and Karlen, 2004; Filipovic vd., 2006). Pulluğun kullanıldığı geleneksel (Tebrügge and Düring, 1999) veya azaltılmış toprak işleme uygulamalarına (McVay vd., 2006) göre doğrudan ekim uygulamasının üst toprak katmanlarında toprak sıkışmasını artırabileceği (Rasmussen, 1999) ortaya konulmuştur. Fabrizzi vd. (2005) ve Gözübüyük vd. (2017) ise toprak sıkışmasının genelde olduğunu, doğrudan ekim uygulamasındaki toprak sıkışmasının bitkiler üzerinde her zaman zararlı bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

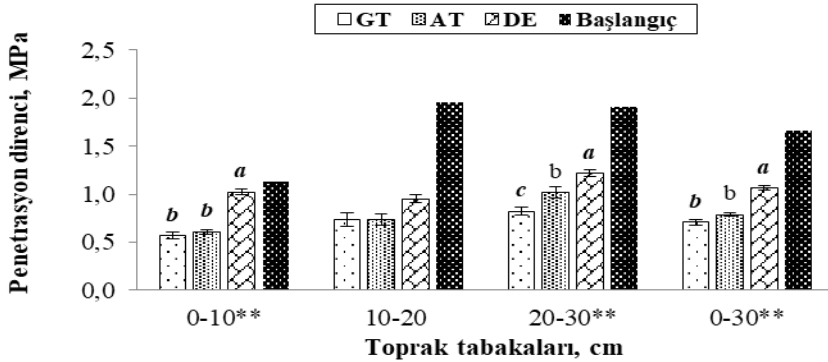
Singh vd. (1992) sınır değer olarak 1.3 g/cm³'e eşit veya daha düşük kütle yoğunluğuna sahip herhangi bir toprağın bitki gelişimini sınırlamadığını ifade etmiştir.



Şekil 4.5. Hasat sonrası kütle yoğunluğu, tane yoğunluğu ve toplam porozite değerleri

4.5. Toprak penetrasyon direnci

Toprağın penetrasyon direnci, toprak sıkışma gücüne, toprak tipine, su içeriğine, arazi kullanım durumuna ve yetiştirilen ürünün çeşidine bağlı olarak bitki kök gelişimini ve dolayısıyla da verimi yakından ilgilendiren bir parametredir (Sillon vd., 2003; Tarawally vd., 2004). Yapılan ölçümlerde hasat sonrası değerler 0.50 MPa ile 1.25 MPa aralığında değişim göstermiştir. Varyans analiz sonuçlarına göre toprak işleme-ekim yöntemleri arasında istatistiksel olarak 10–20 cm tabakasında fark bulunamamış, diğer tabakalarda $P < 0.01$ düzeyinde önemli farklılıklar belirlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Toprak penetrasyon direnci değerleri

Dolayısıyla toprağın işlenmesine ve işleme derinliğine bağlı olarak penetrasyon direnci değerleri azalmaktadır. Toprağa herhangi bir işleme müdahalesinin olmadığı, tohumları 4–5 cm derinliğindeki çiziye bırakan anıza doğrudan ekim yönteminde ise penetrasyon direnci değerleri %50 artarak 1.065 MPa seviyesine ulaşmıştır. Genel olarak yağışa dayalı olarak tarım yapılan topraklar sıkışmaya karşı daha yüksek bir direnç gösterirler, çünkü katı kütle içerisindeki parçacıklar arasındaki bağlar kuvvetlidir ve deformasyona karşı direnç gösterirler (Gözübüyük vd., 2014).

Elde edilen penetrasyon direnç değerlerinin kök gelişimini engelleyici sınır olarak kabul edilen 3 MPa sınır değerinin altında olduğu belirlenmiştir (Busscher and Sojka, 1987; Hakansson and Lipiec, 2000). Farklı toprak işleme çalışmalarında özellikle sıfır ya da minimum toprak işlemenin olduğu yöntemlerde toprak işleme derinliği azaldıkça buna bağlı olarak penetrasyon değerlerinde artış beklenen bir durumdur. Toprağın penetrasyon direnci ile toprak işleme derinliği arasında negatif yönde doğrusal bir ilişki olduğu geçmişteki birçok çalışmada belirlenmiştir (Altuntaş ve Dede, 2007; Çakır vd., 2006).

4.6. Toprak parçacık boyut dağılımı

Uygulanan yöntemlerin toprağı parçalama etkilerini ortaya koymak amacıyla 7 ayrı çap grubunda eleme yapılmış, elde edilen 8 farklı parçacık boyutuna ve optimum parçacık büyüklük dağılımı olan 1–8 mm’lik çap grubuna varyans analizi uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, <1 mm çap grubunda toprak işlem–ekim uygulamalarının toprak parçacık dağılımına etkisi %1 düzeyinde önemli, 2–4 mm ve 32–63 mm çap gruplarında ise %5 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir. Diğer çap gruplarında istatistiki olarak uygulamaların toprağın parçacık dağılımına etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Her üç toprak işleme–ekim yönteminde en yüksek parçacık dağılım oranına sahip olan 1 mm’den küçük parçacıklar arasında toprağın dönerek işlendiği dik rotavatör kullanıldığı AT yöntemi yaklaşık %29’luk bir oranla 1. gruba girmiş, bunu sırasıyla yaklaşık %23 ve %20 ile benzer etkiye sahip DE ve GT yöntemleri takip etmiştir (Çizelge 4.1). Zou vd. (2002) toprak işlemenin tarım

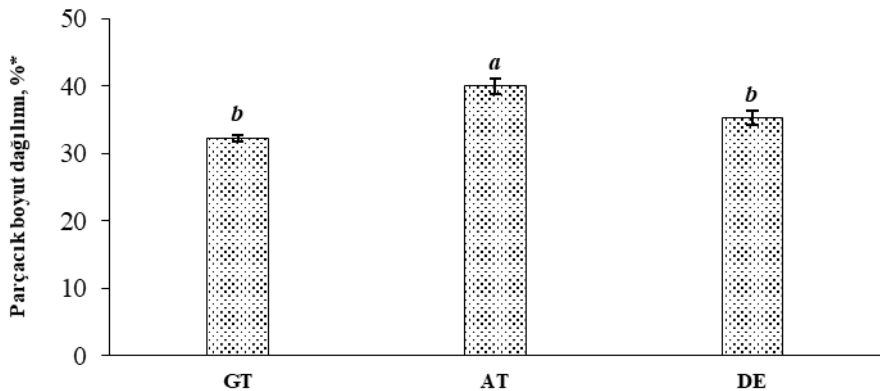
toprakları parçacık dağılımına önemli etkisi olduğunu, ayrıca Wang vd. (2006) toprak parçacık dağılımı ile toprak işleme arasında dikkate değer farklılık olduğunu bulmuşlardır.

Çizelge 4.1. Toprak parçacık boyut dağılımı (%) değerleri

Elek çapları (mm)	GT	AT	DE
< 1**	19.89 ± 0.54 <i>b</i>	29.13 ± 0.74 <i>a</i>	22.97 ± 0.97 <i>b</i>
1 – 2	11.46 ± 0.27	12.87 ± 0.283	12.11 ± 0.90
2 – 4*	11.02 ± 0.64 <i>b</i>	15.87 ± 1.15 <i>a</i>	12.25 ± 0.53 <i>b</i>
4 – 8	9.84 ± 0.73	11.27 ± 0.32	10.94 ± 0.20
8 – 16	16.02 ± 2.52	14.21 ± 0.99	18.56 ± 3.47
16 – 32	11.32 ± 1.53	11.52 ± 0.52	13.01 ± 1.84
32 – 63*	8.18 ± 0.64 <i>a</i>	5.13 ± 0.41 <i>b</i>	5.63 ± 0.38 <i>b</i>
> 63	12.27 ± 3.38	0.00 ± 0.00	4.53 ± 2.27

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim. **:P<0.01; *:P<0.05

Optimum tohum yatağı için önemli olan 1 ile 8 mm elek çapındaki parçacıkların toplamalarına yapılan varyans analizinde, uygulamaların etkisi %5 düzeyinde önemli bulunmuş ve %40 ile azaltılmış uygulama en iyi sonuçla birinci gruba, DE ve GT ise benzer etkiyle ikinci gruba dâhil olmuşlardır (Şekil 4.7). Bu durum kuyruk milinden hareketli, düşey yönde toprağı en iyi parçalayarak optimum tohum yatağı hazırlayan ve nem kaybına yol açmayan dik rotavatörde kaynaklanmıştır (Gözübüyük vd., 2017).



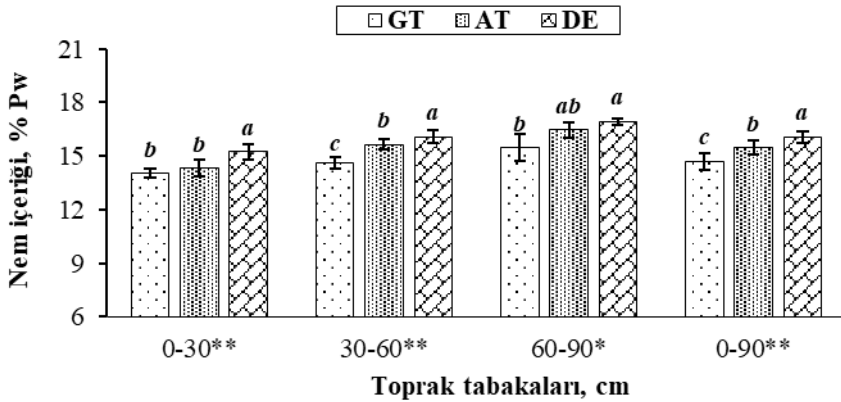
Şekil 4.7. Optimum toprak parçacık boyut dağılımı (1–8mm)

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim, *: P<0.05

4.7. Toprak nem birikimleri

Uygulamaların toprağın nem birikimine etkilerini belirlemek amacıyla, hasattan sonra 0–30, 30–60 ve 0–90 cm toprak tabakalarında gravimetrik yöntemle belirlenen toprak nem içerikleri ve varyans analizi sonuçları Şekil 4.8’de, verilmiştir.

Toprak işleme–ekim yöntemlerinin, 60–90 cm’lik tabakasında toprak nemini artırmıştır. En düşük değer GT uygulamasında gözlenmiştir. DE yönteminin toprak nem birikimine pozitif etkilerinin alt üst olmayan toprakta ki bitki örtüsüne bağlı daha düşük toprak sıcaklığının buharlaşmayı azaltması ve ayrıca düşen yağışın daha etkili tutulmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Gözübüyük vd., 2015). Gözübüyük vd., 2014 ve Çapar ve Uçan, 2015’de kışlık buğday bitkisinde 0–30, 30–60 ve 60–90 cm derinliklerinde koruyucu toprak işleme–ekim yöntemlerinin geleneksel uygulamaya göre toprakta daha fazla nem biriktirdiği özellikle birikimin 0–30 cm’lik yüzey tabakasında daha belirgin olduğunu ifade etmişlerdir.



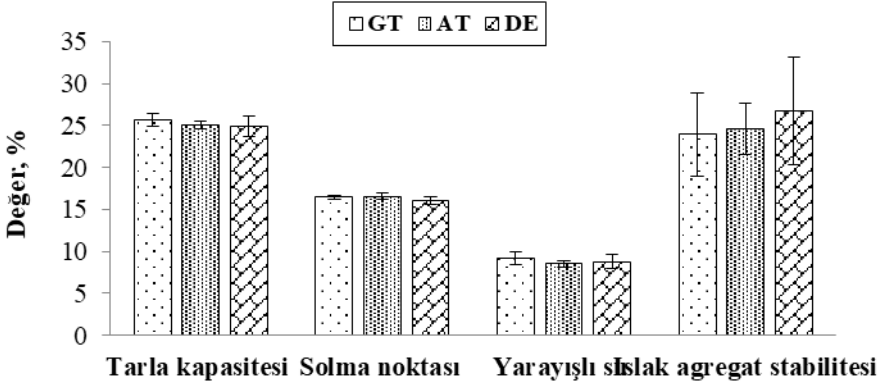
Şekil 4.8. Hasat dönemi toprak nem içerikleri

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme DE: doğrudan ekim. **: P<0.01; *: P<0.05

4.8. Tarla kapasitesi, solma noktası, yarayışlı su ve ıslak agregat stabilitesi

Tarla kapasitesi ve solma noktasında tutulan nem miktarı ile yarayışlı su ve ıslak agregat stabilitesi değerleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Analiz sonucunda farklı toprak işleme–ekim yöntemlerinin bu parametreler üzerinde etkisinin olmadığı belirlenmiştir. McVay vd.

(2006) tarafından da 5 farklı bölgede 23 yıl boyunca sürdürdürülen çalışmada önemli değişimlerin gözlenmesinin uzun yıllar gerektirdiği ifade edilmiştir. Bayer vd. (2001), toprak işleme yoğunluğundaki artışın toprak organik maddesinin hızlı bir şekilde kaybolmasına, düşük biyolojik aktiviteye ve agregat stabilitesinde azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Lal vd. (1994) azaltılmış toprak işleme uygulamaları, geleneksel toprak işlemeye göre toprak agregasyonunu daha iyi geliştirdiğini belirtmişlerdir. Rolda'n vd. (2005)'da 0–5 cm derinlikte anıza doğrudan ekim yönteminin uygulandığı topraklardaki agregat stabilitesinin, toprak işlemenin yapıldığı parsellere göre daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

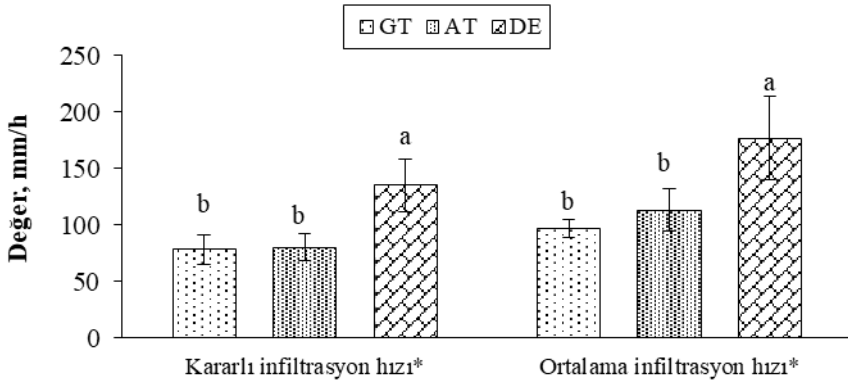


Şekil 4.9. Tarla kapasitesi ve solma noktasında tutulan nem miktarları (Pw) ile yarayışlı su (Pw) ve ıslak agregat stabilitesi değerleri

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim

4.9. İnfiltrasyon hızı

Hasattan sonra çift silindirli infiltrometrelerle yapılan 120 dakikalık ölçüm değerlerinden kararlı infiltrasyon ve ortalama infiltrasyon hızı değerleri hesaplanarak varyans analizine tabi tutulmuştur. Farklı toprak işleme–ekim yöntemlerinde bu parametrelere etkisinin %5 düzeyinde önemli olduğu görülmüş ve benzer etkiyle ikinci gruba girmiştir. Her iki parametrede de DE uygulaması en iyi sonuçla 1. gruba, AT ve GT uygulamaları da benzer etkisi ile ikinci gruba yer almıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Kararlı ve ortalama infiltrasyon hızları

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim. *:P<0.05

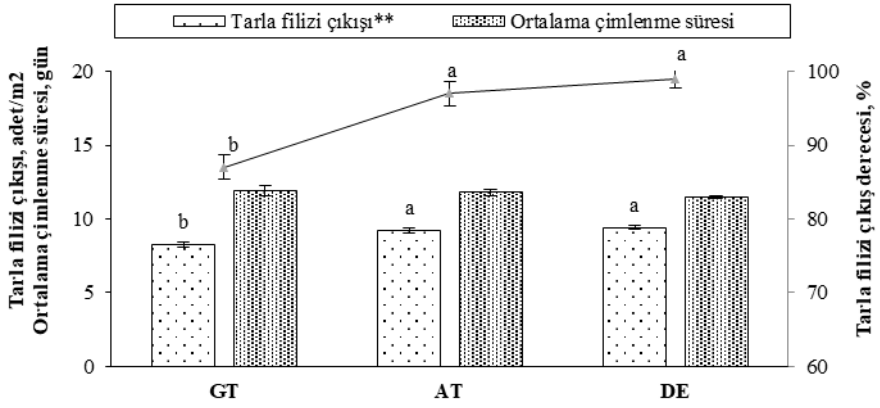
DE yönteminde kararlı infiltrasyon hızı GT yönteminden %42.1, ortalama infiltrasyon hızı da %45.1 daha yüksek bulunmuştur. DE yönteminde infiltrasyon hızında artışın tarla trafiğinin azalmasıyla toprakta sıkışmanın azalması ve makroporlarda artış eğiliminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Toprağa suyun infiltre olması toprak yapısı, gözenek büyüklüğü ve kütle yoğunluğu ile doğrudan orantılıdır (Badalíkova, 2010). Bu konuda yapılan pek çok çalışmada farklı sonuçlar elde edilmiş, bazılarında doğrudan ekim yöntemlerinin toprağın infiltrasyon hızını düşürdüğü bildirirken (Abu–Hamdeh, 2002; Lipiec *vd.*, 2006), bazılarında koruyucu toprak işleme uygulamaların toprakta daha fazla yüzey kalıntısı bıraktığı ve üst–alt toprak katmanları arasında makro gözeneklerin bağlantısını sağladığı gerekçeleriyle infiltrasyonu artırabildiği bildirilmiştir (Strudley *vd.* 2008; Subbulakshmi *vd.*, 2009). Yine Carter *vd.* (2002)’de hidrolik iletkenliğinin anıza doğrudan ekim yönteminde geleneksel toprak işlemeye göre daha fazla olduğunu, Servadio *vd.* (2005)’de tarla trafiğinin artışına bağlı olarak hidrolik iletkenlikte azalma olduğunu gözlemişlerdir. Benzer şekilde Altıkat ve Çelik, (2009)’de toprak işleme yoğunluğunun artışına paralel olarak artan tarla trafiği ve toprak sıkışmasının infiltrasyon hızında azalmaya yol açtığı ifade edilmiştir. Yine Carter *vd.* (2002)’de, toprağın hidrolik iletkenliğinin anıza doğrudan ekim yönteminde geleneksel toprak işlemeye göre daha fazla olduğunu, Servadio *vd.* (2005)’de tarla trafiğinin artışına

bağlı olarak toprak hidrolik iletkenliğinde azalma olduğunu gözlemişlerdir. Benzer şekilde, Altıkat ve Çelik, (2009)'da, toprak işleme yoğunluğunun artışına paralel olarak tarla trafiği ve toprak sıkışmasını artırdığı ve bunun da infiltrasyon hızında azalmaya yol açtığını ifade etmişlerdir.

4.10. Bitki Gelişimi, Verim ve Kalite

Tarla filizi çıkışı, süresi ve derecesi

Toprak işleme–ekim yöntemlerinin tarla filizi çıkışı ve tarla filizi çıkışı derecesine etkisinin %1 düzeyinde önemli, ortalama çıkış süresine ise etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Toprak işleme–ekim yöntemleri arasında, tarla filizi çıkışlarında ve çıkış derecelerinde DE yöntemi AT yöntemi ile birlikte birinci gruba girmiş, GT uygulamasından önemli derecede farklılık göstermiştir (Şekil 4.11). Buna göre doğrudan ekim konusunda birim alandan 9.42 adet filizi çıkışıyla ve %99 çıkış derecesiyle en yüksek sonuç elde edilmiş, bunu aynı istatistiksel gruba dâhil olan AT ve birim alanda 8.25 adet bitki sayısı ve %87 çıkış derecesiyle GT takip etmiştir. Ortalama çimlenme süresinde ise GT uygulaması 11.93 günde çimlenmesini tamamlarken, AT uygulaması %1.21, DE uygulaması ise %3.67 oranında daha erken çıkış sağlamıştır. Doğrudan ekim parsellerinde anız gölgesi ve toprağın altüst edilmemesi nedeniyle toprak sıcaklığının düşmesinin buharlaşmayı azaltarak diğer parsellere göre nem birikiminin daha fazla olmasına neden olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmaların birinde en yüksek çimlenme oranı ve tarla filiz çıkış derecesi değerlerini azaltılmış toprak işleme ve sırta ekim yönteminde elde etmişlerdir. Gözübüyük vd. (2001)'de yaptıkları çalışmada kuru ve sulu tarım koşullarında fiğ bitkisinde tarla filizi çıkışlarında anıza doğrudan ekim yönteminin en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir.



Şekil 4.11. Tarla filizi çıkış değerleri

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim **: P<0.01; *: P<0.05

Vejetatif gelişme

Toprak işleme–ekim yöntemlerinin silajlık mısırdaki bitki boyu, yaprak ve kök ile en düşük sap ve koçan oranı DE uygulamasında belirlenmiş, bulgular GT ve AT uygulamalarındakilerden önemli derecede farklı bulunmuştur. Koçan oranının yüksek olması ve sap oranının da düşük olması daha kaliteli ürün anlamına geldiğinden, DE uygulamasında koçan oranı biraz düşük olmasına rağmen yaprak oranının yüksek ve sap oranının da düşük olması genelde DE lehine bir avantaj olmuştur.

Çizelge 4.2. Silajlık mısırın vejetatif gelişme değerleri

Vejetatif gelişme parametreleri	GT	AT	DE
Gövde çapı. cm	1.95 ± 0.02	2.11 ± 0.01	2.12 ± 0.01
Bitki boyu. cm**	226.76 ± 3.06 b	225.64 ± 2.45 b	240.86 ± 1.46 a
İlk boğum uzunluğu. cm*	7.25 ± 0.62 b	7.87 ± 0.378 b	9.08 ± 0.50 a
İlk koçan yüksekliği. cm*	58.12 ± 6.28 b	57.14 ± 5.43 b	70.28 ± 1.37 a
Sap oranı. % *	39.85 ± 0.20 ab	40.12 ± 0.16 a	39.16 ± 0.11 b
Yaprak oranı. % **	15.68 ± 0.12 b	15.60 ± 0.20 b	17.43 ± 0.22 a
Koçan oranı. % **	44.47 ± 0.19 a	44.28 ± 0.09 a	43.41 ± 0.23 b

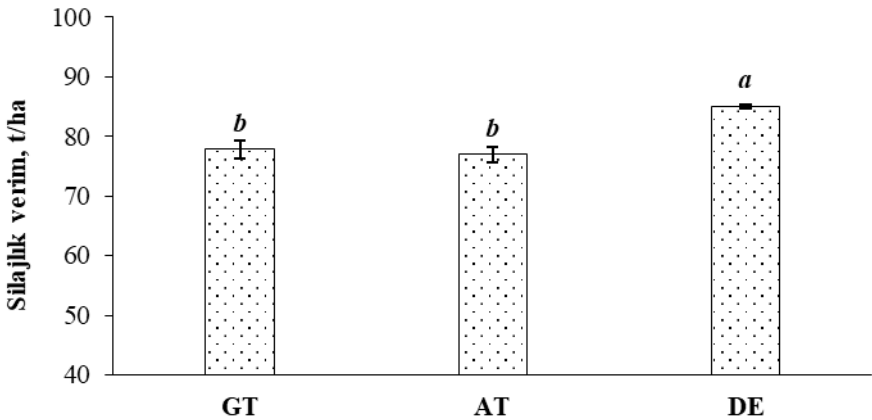
GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim. **: P<0.01; *: P<0.05

Altuntaş ve Dede, (2007) yaptıkları azaltılmış toprak işleme yönteminde geleneksel toprak işleme yöntemine göre daha yüksek

bitki boyu, gövde çapı, yeşil ot ve kuru ot verim değerleri elde etmişlerdir. Çakır vd. (2006) azaltılmış toprak işleme yöntemlerinin mısırdaki daha yüksek bitki boyu ve verim sağladığını, Altuntaş ve Dede (2007)'de silajlık mısırın bitki boyu, gövde çapı, yeşil ot veriminin azaltılmış toprak işleme yönteminde geleneksel toprak işleme yöntemine göre daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Silajlık verim

Toprak işleme–ekim yöntemlerinin silajlık mısır verimine etkisinin %1 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir. Anıza doğrudan ekim uygulaması birim alandan (1 ha) 85 ton verim değeri ile en iyi, bunu %7.2 azalış ile geleneksel toprak işleme yöntemi (77.8 t/ha) ve %8.1 azalış ile azaltılmış toprak işleme yöntemi (76.9 t/ha) takip etmiştir. Doğrudan ekim uygulaması en fazla verim ile birinci grupta yer alarak, AT uygulaması ile en az verim veren GT uygulaması ikinci grubu oluşturmuştur. Bu çalışmada DE yönteminde daha fazla verim alınması bitki gelişimi aşamasının önemli bir kısmında toprak neminin daha yüksek düzeyde kalarak oluşturduğu düşük toprak nem geriliminin bir sonucu olarak değerlendirilmiştir (Şekil 4.12). Yabancı otla mücadele iyi yönetildiği takdirde, uygun bir koruyucu toprak işleme yöntemiyle verim azalışları olmadan veya sınırlı verim düşüşleri ile iyi sonuçların alınacağı geçmişteki birçok çalışmada da ifade edilmiştir (Gözübüyük vd., 2001; Kumar vd., 2013; Gözübüyük vd., 2015).

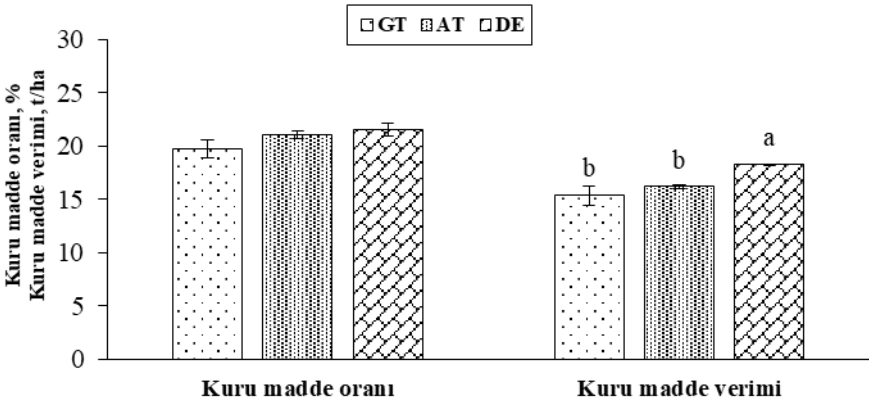


Şekil 4.12. Mısır silajlık verim değerleri

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim. **: P<0.01

4.11. Kuru madde oranı ve kuru madde verimi

Farklı toprak işleme–ekim yöntemlerinin silajlık mısırdaki kuru madde oranı ve kuru madde verimine etkilerinin varyans analizi sonuçlarına göre yöntemlerin kuru madde oranına etkisi olmadığı ancak kısmen de olsa da DE'nin daha fazla kuru madde oranı sağladığı, kuru madde verimine ise etkisinin %5 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir. DE yöntemi %21.5 kuru madde oranı sağlarken, AT yönteminde %21.1, GT yönteminde ise %19.8 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.17). Kuru madde verimlerinde ise doğrudan ekim yöntemi (21.5 t/ha) geleneksele göre %19 daha fazla kuru madde verimine neden olmuş ve birinci grupta yer almıştır. AT uygulaması ise GT ile benzer sonuçla aynı grupta yer almış ve %5.3 oranında daha fazla kuru madde verimi sağlamıştır (Şekil 4.13). Kuru madde verimleri su tüketim değerleri ile ters oranda paralellik göstermiştir. Koruyucu toprak işleme yöntemlerinin toprakta verimde ve özellikle kuru madde veriminde artışa sebep olduğu bazı çalışmalarda da belirlenmiştir (Thomas vd. 1996; Altuntaş ve Dede, 2007).

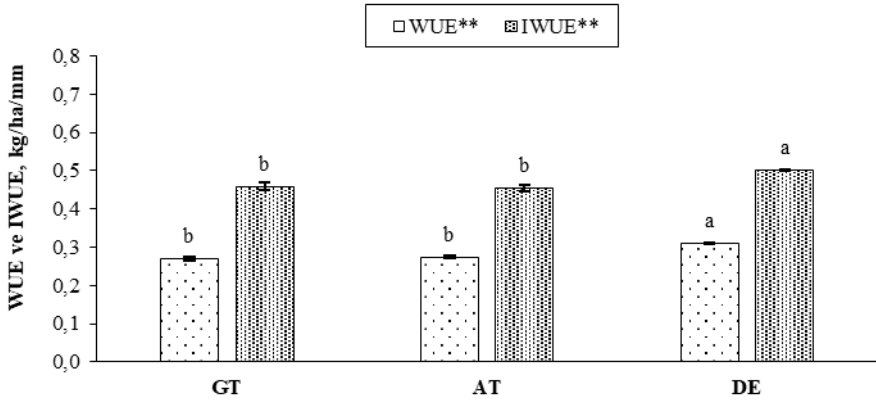


Şekil 4.13. Silajlık mısır kuru madde oranları ve verimleri

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim. *: P<0.05

4.12. Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) ve su kullanım etkinliği (WUE)

Toprak işleme–ekim yöntemlerinin WUE ve IWUE değerlerine etkisi %1 düzeyinde önemli bulunmuş, her iki parametrede de DE yöntemi birinci gruba, diğer iki uygulama benzer etkiyle ikinci gruba dâhil olmuştur. Doğrudan ekimde uygulanan 1 mm sulama suyuna karşılık 501 kg verim elde edilirken, GT yönteminde 459 kg ve AT yönteminde ise 453 kg alınmıştır. Silajlık mısırın tükettiği birim suya (1 mm) karşılık gelen verim değerlerinde yine doğrudan ekim yönteminde 311 kg, AT yönteminde 274 kg ve GT yönteminde ise 268 kg verim elde edilmiştir. Bu durumda doğrudan ekim yöntemi toprakta mevcut suyu en iyi kullanan yöntemi oluşturmuş ve geleneksel yönteme göre IWUE değerini %9.3, WUE değerini de %16 oranında artırmıştır. DE yönteminde ET'nin en düşük (Şekil 4.4) ve veriminde en yüksek (Şekil 4.13) olması en yüksek WUE ve IWUE değerlerini ortaya çıkarmıştır. AT ve GT yöntemlerinde de benzer verim (Şekil 4.14) değerleri ET kısmen farklı olmasına rağmen benzer etkiye neden olmuştur. Casa and Lo Cascio (2008)'da çalışmalarında no-till uygulamalarından geleneksel uygulamaya göre mısırdâ daha yüksek sulama suyu etkinliği değeri belirlemiştir.



Şekil 4.14. Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) ve su kullanım etkinliği (WUE) değerleri

GT: Geleneksel toprak işleme, AT: Azaltılmış toprak işleme, DE: doğrudan ekim. **: P<0.01

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek rakım koşullarında yarı kurak iklim kuşağında yer alan bir bölgede geleneksel toprak işleme-ekim yöntemine alternatif olabilecek koruyucu toprak işleme-ekim yöntemlerinin silajlık mısır gelişimine, su kullanımına ve verimine etkileri araştırılmıştır.

Vejetasyon periyodunda ölçülen toprak nemi yarayışlı suyun %50'sine düştüğünde yüzey üstü damla sulama yöntemi ile sulama koşullarında toplam 169.6 mm sulama suyu uygulanmış, GT, AT ve DE yöntemlerinde mevsimlik su tüketimleri sırasıyla 290, 280.4 ve 273.2 mm olarak belirlenmiştir. Silajlık verim GT yönteminde 77.80 t/ha, AT yönteminde 76.91 t/ha ve DE yönteminde 85.0 t/ha, WUE değerleri GT, AT ve DE yöntemlerinde sırasıyla 0.268, 0.274 ve 0.311 t/ha/mm ve IWUE değerleri de sırasıyla 0.459, 0.454 ve 0.501 t/ha/mm olmuştur. Kuru madde verimi de GT yönteminde 15.39 t/ha, AT yönteminde 16.21 t/ha ve DE yönteminde 18.32 t/ha olarak belirlenmiştir. DE yönteminde daha iyi verim sonuçlarının elde edilmesinde iyi bir çimlenme ve çıkışın önemli katkıları olduğu açıktır. Çünkü koruyucu toprak işlemede tarla filiz çıkışı ve tarla filiz çıkış derecesi en fazla belirlenmiştir. Bu durumda vejetatif gelişimde iyileşmiş, sonuçta daha fazla verim değerlerine ulaşılmıştır. Koruyucu toprak işleme uygulamalarında aynı sulama miktarına karşılık toprakta daha fazla bakiye nem sağlanması ve daha az su tüketimi ile daha fazla verime ulaşılması sulama miktarını sınırlandırarak temiz su kaynaklarının korunmasına katkı açısından önemli bulunmuştur.

Toprak işleme-ekim yöntemlerinin kısa süreli bu çalışmada toprak fiziksel ve hidrolik özellikleri üzerinde de kısmi etkileri gözlemlenmiştir. Geleneksel yaklaşımla derin toprak işlemenin daha yüksek porozite değerleri sağlamasına rağmen tarla kapasitesi ve yarayışlı su miktarı ile gözenek büyüklük dağılımı üzerinde etkisi olmamış, agregat stabilitesini etkilememiş, infiltrasyona negatif katkı sağlamış, penetrasyon direncini azaltmış ve optimum parçacık boyut dağılımında en düşük değerlere neden olmuştur. Aksine doğrudan ekim yönteminde ise düşük porozitenin göstergesi olarak sıkışmanın etkisini yansıtan toprak penetrasyon direnci artmış ancak gözenek büyüklük dağılımı etkilenmemiş, muhtemelen porların bağlantılarının

sürekliliğine bağı olarak infiltrasyon hızlarında önemli iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak hayvansal üretimin yoğun olarak yapıldığı kurak ve yarı kurak bölgelerde silajlık mısır, hayvan yeşil yem ihtiyacını karşılamak için giderek yükselen bir oranda yetiştirilen ve denemenin yürütüldüğü bölge içinde oldukça önemli olan bir bitkidir. Bunun yanında temiz su kaynakları üzerinde artan baskı, su tasarrufuna yönelik farklı stratejilerin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda yüksek rakımlarda ve yarı kurak iklim koşullarında silajlık mısırdaki güçlü ve etkili çimlenme ve çıkışı sağlayan daha iyi gelişme ve daha yüksek verim ile su-verim etkinliğini artıran, toprakta nemi muhafaza ederek su tasarrufu sağlayan aynı zamanda toprak işleme ekipman ihtiyacını da azaltarak üretim girdilerinin azalmasına katkı katkılar sağlayan yeni yöntemlerin uygulanması artık kaçınılmaz olmuştur. Bu sebeple yürütülen bu çalışmada sulama suyu ve su kullanım etkinliğini artıran verim ve su tasarrufuyla artıran, infiltrasyonu iyileştiren, aynı zamanda sürdürülebilirliği mümkün olan ve son yıllarda da artan bir ivmeyle dünyada hızla yayılan, doğrudan ekim uygulamasında AT ve GT uygulamalarına göre çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Üretimde amaç maliyet girdilerini azaltıp, karı maksimize etmektir. Bu çalışma ile toprağı daha az müdahale, daha az insan ve makina işgücü gereksinimi ile ve daha da önemlisi daha az girdi ile silajlık mısırın yetiştirilebileceğı belirlenmiştir. Böylece zamanın ve kaynakların etkin kullanılması, toprağın ve diğer doğal kaynakların sürdürülebilirliği açısından, alınabilecek önlemler ile kıt olan doğal kaynakların daha rantabil kullanılması sağlanabilmiştir.

KAYNAKÇA

- Abu-Hamdeh, N.H., 2002. Effect of Soil Manipulation and Other Field Parameters on Soil Physical Properties. Vol: II, p. 99-102, Proceedings of 12th ISCO Conference, May 26-31, Beijing, China.
- Afzalnia, S., Zabihi J., 2014. Soil Compaction Variation During Corn Growing Season Under Conservation Tillage-Soil and Tillage Research 137: 1- 6.
- Alletto, L., Pot V, Giuliano S, Costes M, Perdrieux F, Justes E., 2015. Temporal Variation in Soil Physical Properties Improves The Water Dynamics Modeling in A Conventionally-Tilled Soil. Geoderma 2015, 243, 18-28.
- Altıkat, S. ve Çelik A., 2009. Toprak İşleme Sistemlerinin Önemli Bazı Toprak Kalite Kriterlerine Olan Etkileri. Alınları Zirai Bilimler Dergisi. 16 (B)-2009 33-41 ISSN:1307-3311.
- Altuntaş, E ve Dede S., 2007. Orta Karadeniz Geçit İklim Kuşağında İkinci Ürün Silajlık Mısır Tarımında Farklı Toprak İşleme ve Ekim Yöntemlerinin Toprak Özellikleri ve Verim Üzerine Etkileri. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 4(3).
- Anonymous, 1983. Fundamentals of No-Till Farming. American Associations for Vocational Instructional Materials. Driftmier Enngineering Center Athens, GA 30602.
- Arıtürk M.E. ve Erdem, Y., 2011. İkinci Ürün Silajlık Mısıra (Zea Mays L.) Sulama Zamanının Planlanması ve Su-Verim-Kalite İlişkilerinin Belirlenmesi, ADÜ Ziraat Fakültesi Dergisi 2011; 8(1) : 73-82.

- Aslangiray, C., Tansı V., Sağlamtimur T., 1991. Çukurova Koşullarında İkinci Ürün Olarak Ekilen Mısır (*Zea Mays* L.) ve Sorgum (*Sorghum* Sp.) Tür ve Çeşitlerinin Gelişme Dönemlerine Göre Biyolojik Üretimlerinin Saptanması Üzerinde Bir Araştırma. Türkiye 2. Çayır-Mera ve Yembitkileri Kongresi, 28-31 Mayıs 1991, İzmir, 369-378.
- Astier-Calderon, M., Maass-Moreno M., Etchevers-Barra J.D., 2002. Derivation of soil Quality Indicators in The Context of Sustainable Agriculture. *Agrociencia*, 36, 605-620.
- Badalíkova, B., 2010. Influence of Soil Tillage on Soil Compaction. In: Dedousis, A.P., Bartzanas, T. (Eds.), *Soil Engineering, Soil Biology* 20. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 19-30.
- Barut Z.B ., Çelik İ., 2017. Tillage Effects on Some Soil Physical Properties in a Semi-Arid Mediterranean Region of Turkey, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 58, 217-222. DOI: 10.3303/CET1758037.
- Barut, Z. B., Çelik, İ., ve Turgut, M. M. 2010. Buğday tarımında farklı toprak işleme sistemlerinin toprağın bazı fiziksel özelliklerine etkisi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 6(4), 237-246.
- Bayhan Y., Kayışoğlu B., Yalçın H., Gönüloğlu E., Sungur N., 2006. Possibility of direct drilling and reduced tillage in second crop silage corn. *Soil and Tillage Research*, 88: 1-7.
- Bayer, C., Martin-Neto L., Mielniczuk J., Pillon C.N. ve Sangoi L., 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci.Soc. Am. J.*, 65, 1473-1478.

- Bayrak, F., 1997. Bafra Ovası Koşullarında İkinci Ürün Mısırın Su Tüketimi, T.C. Başbakanlık, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Samsun Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları, Genel Yayın No:91, Rapor Serisi No: 78, Samsun.
- Birkas, M., Jolankai M., Gyuricza C., Percze A., 2004. Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary. *Soil & Tillage Research*, 78, 185-196.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability Methods of Soil Analysis, Physical and Mineralogical Methods, Second Editions. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America Inc., 9 (1) 463-478, Publisher Madison Wisconsin, USA.
- Busscher, W.J., and Sojka R.E., 1987. Enhancement of subsoiling effect on soil strength by conservation tillage. *Transactions of the ASAE*, 30(4), 888-892.
- Carter, M., Sanderson J., Ivany J. ve White R., 2002. Influence of Rotation and Tillage on Forage Maize Productivity, Weed Species, and Soil Quality of a Fine Sandy Loam in The Cool-Humid Climate of Atlantic Canada. *Soil & Tillage Research*, 67, 85-98.
- Casa, R., and Lo Cascio B., 2008. Soil conservation Tillage Effects on Yield and Water Use Efficiency on Irrigated Crops in Central Italy. *Journal of agronomy and crop science*, 194(4), 310-319.
- Crabtree, W.L., 2010. Search for Sustainability with No-Till Bill in Dryland Agriculture. Crabtree Agricultural Consulting, Perth, Western Australia.

- Çakır E., Aykas E., Yalçın H., 2003. Tillage Parameters and Economic Analysis of Direct Seeding, Minimum and Conventional Tillage In Wheat. ISTRO (International Soil Tillage Research Organization) 2003 Conference, Brisbane, Australia.
- Çakır, E., Yalçın, H., Aykas, E., Gülsoylu, E., Okur, B., Delibacak, S., & Ongun, A. R. 2006. Koruyucu Toprak İşleme ve Doğrudan Ekimin İkinci Ürün Mısır Verimine Etkileri: Birinci Yıl Sonuçları. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2(2), 139-146.
- Çapar, F. ve Uçan K., 2015. Kışlık Buğdayda Farklı Toprak İşleme Tekniklerinin Toprak Nem İçeriği ve Verim Parametreleri Üzerine Etkisi. *KSÜ Doğa Bil. Dergisi*, 18(2).
- Çarman, K., 1994. Tractor forward volatility and tine load effects on soil compaction. *J. of Terramechanics*. 31 (1). 11-20.
- Dağdelen N., Akçay H., Sezgin F., Ünay A. ve Gürbüz T. 2009. Farklı Sulama Rejimleri Altında Silajlık Mısırın Su Üretim Fonksiyonlarının Belirlenmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 7(1), 55-64.
- Dam, R.F., Mehdi B.B., Burgess M.S.E., Madramootoo C.A., Mehuys G.R., Callum I.R., 2005. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil Tillage Res.* 2005, 84, 41-53.
- DATAE, 2015. Hidro-meteorolojik Gözlem Verileri. Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Erzurum.

- Delibaş, L., 1994. Sulama. Trakya Üniv. Zir. Fakóltesi Ders kitabı No:24 Tekirdağ
- Demiralay, İ., 1993. Toprak Fiziksel Analizleri. Atatürk Üni. Ziraat Fak. Yayınları No, 143. Erzurum.
- Derpsch, R., Friedrich T., 2009. Global Overview of Conservation Agriculture No- Till Adoption. 4th World Congress on Conservation Agriculture. New Delhi-India.
- Doorenbos, J., Kassam A., 1979.Yield Response to Water, FAO, Irrigation and Drainage Paper No: 33, Rome, 193.
- DSİ, 2019. DSİ 2018 Yılı Faaliyet Raporu. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Devlet Su İşleri genel Müdürlüğü, Ankara.
- Eghball, B., Mielke L.N., Calvo G.A., and Wilhem W.W., 1993. Fractal Description of Soil Fragmentation for Various Tillage Methods and Crop Sequences. Soil Sci.Soc. America. Proc.,57, 1337-1341.
- Fabrizzi K.P, Garcia F.O, Costa J.L, Picone L.I., 2005. Soil Water Dynamics, Physical Properties and Corn and Wheat Responses to Minimum and No-Tillage Systems in The Southern Pampas of Argentina. Soil Tillage Research, 81: 57-69.
- Filipovic, D, Husnjak S, Kosutic S, Gospodaric Z., 2006. Effects of Tillage Systems on Compaction and Crop Yield of Albic Luvisol in Croatia. Journal of Terramech, 43: 177-189.
- Gajri, P. R., Arora V.K., Chaudhry M.R., 1994. Maize Growth Responses to Deep Tillage, Straw Mulching and Farm Yard Manure in Coarse Textured Soils of N.W. India. - Soil Use Management 10: 15-20.

- Geçit, H.H. vd. 2009. Tarla Bitkileri. A.Ü.Z.F. Ders Kitabı: 521, Yayın No: 1569, ISBN 978-975-482-803-0, Ankara.
- Gençoğlu C. ve Yazar A., 1999. Kısıntılı Su Uygulamalarının Mısır Verimine ve Su Kullanım Randımanına Etkileri. Tr.J.of Agriculture and Forestry, 23, 233-241.
- Gençoğlu, C., Yazar A., 1996. Kısıntılı Su Uygulamalarının Mısır Verimine ve Su Kullanım Randımanına Etkileri (D. Tezi), Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Adana.
- Gholami A., Asgari H.R. and Zeinali E., 2014. Effect of Different Tillage Systems on Soil Physical Properties and Yield of Wheat (case study: agricultural lands of Hakim Abad Village, Chenaran Township, Khorasan Razavi Province). *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(5), 1539-1552.
- Gözübüyük, Z., Öztürk İ., Çelik A., Ören E., Kara M., 2001. Erzurum Kuru ve Sulu Tarım Koşullarında Değişik Toprak İşleme-Ekim Yöntemlerinin Tarla Filizi Çıkışı ve Verim Yönünden Karşılaştırılması. Trakya Toprak ve Su Kaynakları Sempozyumu.24-27 Mayıs 2001 Kırklareli. 470-475.
- Gözübüyük, Z., Öztürk İ., Demir O., Çelik A., 2010. Ayçiçeğinde Farklı Toprak İşleme-Ekim Sistemlerinin Bazı İşletme Parametreleri Yönünden Karşılaştırılması. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science) 2010, 6 (4), 253-259.
- Gözübüyük, Z., Şahin Ü., Öztürk İ., Çelik A., Adıguzel M.C., 2014.

- Tillage Effects on Certain Physical and Hydraulic Properties of a Loamy Soil Under a Crop Rotation in a Semi-Arid Region With a Cool Climate. *Catena* 118 (2014) 195-205.
- Gözübüyük, Z., Öztürk İ., Çelik A., Evren S., Daşçı E., Adıgüzel M.C., 2015. Ayçiçeğinde Ayçiçeği Üretiminin Geleneksel Toprak İşleme-Ekim Yöntemine Alternatif Olabilecek, Farklı Toprak İşleme-Ekim Yöntemlerinin Enerji Kullanım Etkinliği Yönünden Karşılaştırılması. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2015, 11 (2) 113-119.
- Gözübüyük, Z., Sahin Ü., Adıgüzel M.C., Öztürk İ., Çelik A., 2015. The Influence of Different Tillage Practices on Water Content of Soil and Crop Yield in Vetch-Winter Wheat Rotation Compared to Fallow-Winter Wheat Rotation in a High Altitude and Cool Climate. *Agricultural Water Management* 160 (2015) 84-97.
- Gözübüyük, Z., 2016. Erzurum Yöresinde Nadası Kaldırmaya Yönelik Değişik Toprak İşleme-Ekim Yöntemlerinin Bazı İşletme Parametreleri ve Enerji Kullanım Etkinliği. Doktora tezi.
- Gözübüyük, Z., Öztaş T., Çelik A., Yıldız T., Adıgüzel M.C., 2017. Farklı Toprak İşleme ve Ekim Yöntemlerinin Toprağın Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi- Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi 5 (2) 48 – 54.
- Gözübüyük Z., Çelik A., T., Ergüneş G., Yıldız T., Adıgüzel M.C., 2018. Fiğ Üretiminde Farklı Toprak İşleme-Ekim Yöntemlerinin Özgül Çeki Gücü, Yakıt Tüketimi ve İş Başarısına Etkisi. *Atatürk Üniv. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 49 (2): 134-142, 2018 Atatürk Univ., J. of the Agricultural Faculty, 49

(2): 134-142, 2018 ISSN : 1300-9036.

- Gül, İ., Başbağ M., 1999. Diyarbakır Sulu Koşullarında İkinci Ürün Olarak Yetiştirilen Silaj Sorgum, Sorgum-Sudanotu Melezi ve Sudanotu Çeşitlerinde Verim ve Verim Özelliklerinin İncelenmesi. Türkiye 3. Tarla Bitkileri Kongresi, 15-18 Kasım 1999, Adana, 306-311.
- Güngör, Y., Erözel A.Z., Yıldırım O., 1996. Sulama. Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları, No.1443, Ankara, 295.
- Hakansson, I. and Lipiec, J., 2000. A Review of Usefulness of Relative Bulk Density Values in Studies of Soil Structure and Compaction. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 71-85.
- Hall, H.E., Raper R.L., 2005. Development and Concept Evaluation of an on-the-go Soil Strength Measurement System. *Transaction of the ASAE* 48, 469-477.
- Hermawan B, Cameron K.C., 1993. Structural Changes in a silt Loam Under Long-Term Conventional or Minimum Tillage. *Soil and Tillage Research* 26: 139-150.
- Hernández, T. D. B., Slater, B. K., Corbalá, R. T., and Shaffer, J. M. (2019). Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils. *Soil and Tillage Research*, 186, 270-279.
- Howell, T.A., Cuenca H.A., Solomon K.H., 1990. Crop Yield Response. *Management of Farm Irrigation Systems*. Trans. ASAE Monograph Chap S. USA.
- Idowu, O. J., Sultana, S., Darapuneni, M., Beck, L., and Steiner, R. (2019). Short-term Conservation Tillage Effects on Corn Silage

- Yield and Soil Quality in an Irrigated, Arid Agroecosystem. *Agronomy*, 9(8), 455.
- Jensen, M.E., Burman R. D., Allen R. G., 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70. ASCE, New York.
- Jigau, G., 2010. Processes and Factors of Porosity Evolution. Factori și Procese Pedogenetice din Zona Temperată, 9: 1-12.
- Kahlon, M.S., Khurana K., 2017. Effect of Land Management Practices on Physical Properties of Soil and Water Productivity in Wheat-Maize System of Northwest India.
- Kanber, R., 1999. Sulama. Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları, No.174, Adana, 530.
- Karaağaç, H. A., 2007. İkinci Ürün Silajlık Mısır Tarımında Farklı Toprak İşleme ve Ekim Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Karaağaç, H.A., Barut, Z.B., 2009. Farklı Toprak İşleme ve Ekim Sistemlerinin Silajlık Mısır Gelişimi ve İşletme Ekonomisine Etkisi. 25. Tarımsal Mekanizasyon Kongresi. s:367-374. 01-03 Ekim 2009. Isparta.
- Karasu A., Kuşçu H., Oz M., Bayram G., 2015. The Effect of Different Irrigation Water Levels on Grain Yield, Yield Components and Some Quality Parameters of Silage Maize (*Zea mays indentata* Sturt.) in Marmara Region of Turkey. Not Bot Horti Agrobi, 2015, 43(1):138-145.

- Karlen D.L., 2004. Soil Quality As an Indicator of Sustainable Tillage Practices. *Soil & Tillage Research* 78, 129-130.
- Kızıloğlu, F.M., Şahin Ü., Kuşlu Y., Tunç T., 2009. Determining Water-Yield Relationship, Water Use Efficiency, Crop and Pan Coefficients for Silage Maize in A Semiarid Region. *Irrig. Sci* ,27:129-137.
- Klute, A., 1986. Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Properties. Part I, 2nd ed. ASA-SSSA Agronomy no: 9, Madison, WI, 1173.
- Kumar, V., Saharawat Y.S., Gathala M.K., Jat A.S., Singh S. K., Chaudhary N. ve Jat M.L., 2013. Effect of Different Tillage and Seeding Methods on Energy Use Efficiency and Productivity of Wheat in the Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Research* 142 (2013) 1-8.
- Lal, R., Elder, J. W., 2008. Tillage effects on physical properties of agricultural organic soils of north central Ohio. - *Soil and Tillage Research* 98: 208-10.
- Lal, R., Mahboubi A.A. ve Fausey N.R., 1994. Long-Term Tillage and Rotation Effects on Properties of a Central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, 517-522.
- Lipiec, J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A., and Nosalewicz A., 2006. Soil Porosity and Water İnfiltration as Influenced by Tillage Methods. *Soil and Tillage research*, 89(2), 210-220.
- Logsdon, S.D., Karlen D.L., 2004. Bulk Density as a Soil Quality Indicator During Conversion to No-Tillage. *Soil Tillage Research*, 78: 143-149.

- Lopez, M. V., Arrue J.L. and Sanchez, G.V., 1996. A Comparison Between Seasonal Changes in Soil Water Storage and Penetration Resistance Under Conventional and Conservation Tillage Systems in Aragon. *Soil and Tillage Research*. 37 (4), 251-271.
- McVay, K.A, Budde J.A., Fabrizzi K., Mikha M.M., Rice C.W., Schlegel A.J., Peterson D.E., Sweeney D.W., Thompson C., 2006. Management Effects on Soil Physical Properties in Long-Term Tillage Studies in Kansas. *Soil Science Society America Journal*, 70: 434-438.
- Mohanty, M., Painuli D.K. 2004. Modelin Grice Seedling Emergence and Growth Under Tillage and Residue Management in Rice-Wheat System on A Vertisol in Central India. *Soil and Tillage Research*. 76. 167-174.
- Moraes, M. H., Benez S. H., 1996. Effects of Different Soil Tillage System on Some Physical Properties of Terra Roxa Estruturada and on Grain Yield of Corn For one Year of Tillage. *Engenharia Agricola*. 16 (2), 31-41.
- Nunes, M. R., van Es, H. M., Schindelbeck, R., Ristow, A. J., and Ryan, M. 2018. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. *Geoderma*, 328, 30-43.
- Oliver R, Douzet J.M., Scopel E., Blanchart E., Curmi P., Alves Moreira J.A., Minette S., Guerin P., Fortier M., Maraun F., 2002. Medium Term Impact of No Tillage on Some Physical Properties of a Brazilian oxisol of Cerrados (tropical humid Savannah of Central Brazil). In: F Maraun (Ed.), *Confronting*

New Realities in the 21st Century. Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science.

Öz, A., Kapar, H., Dok, M., 2017. Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü

Yayınları.<http://arastirma.tarim.gov.tr/ktae/Belgeler/brosurler/Misir%20Tarimi.pdf> Erişim tarihi:9 Temmuz 2019

Patel, V.L., Tripathi V.K., Sharma O.P.,1985. Parametric Excitation of Shear Alfvén Models by Electrostatic Ion Cyclotron Waves in the Magnetosphere. *Journal of Geophysical Research* 90. doi: 10.1029/JGREAA000090000A10009590000 001. issn: 0148-0227.

Ramos, M.E., Robles A.B., Sanchez-Navarro A., Gonzalez-Rebollar J.L. 2011. Soil Responses to Different Management Practices in Rainfed Orchards in Semiarid Environments. - *Soil and Tillage Research*, 112: 85-91.

Rasmussen, K.J., 1999. Impact of Ploughless Soil Tillage on Yield and Soil Quality: A Scandinavian Review. *Soil Tillage Research*, 53: 3-14.

Ren, L., Nest, T. V., Ruysschaert, G., D'Hose, T., and Cornelis, W. M. 2019. Short-term effects of cover crops and tillage methods on soil physical properties and maize growth in a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 76-86.

Roldán, A Salinas-García,J., Alguacil, M., Díaz, E. ve Caravaca, F., 2005. Soil Enzyme Activities Suggest Advantages of Conservation Tillage Practices in Sorghum Cultivation Under Subtropical Conditions. *Geoderma*, 129,178- 185.

- Roscoe R., Burman P., 2003. Tillage Effects on Soil Organic Matter in the Density Fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil Till. Res.*, 70: 107-119.
- Şahin U. And Anapalı O., 2006. Addition of Pumice Affects Physical Properties of Soil Used for Container Grown Plants. *Agriculture Conspectus Scientificus*, Vol. 71 (2006) No.2 (59-64).
- Servadio, P., Marsili A., Vignozzi N., Pellegrini S. ve Pagliai B., 2005. Effects on Some Soil Qualities in Central Italy Following the Passage of Four Wheel Drive Tractor Fitted With Single and Dual Tires. *Soil & Tillage Research*, 84, 87-100.
- Sillon, J.F., Richard G. ve Cousin I., 2003. Tillage and Traffic Effects on Soil Hydraulic Properties and Evaporation. *Geoderma* 116, 29-46.
- Singh, K. B., Jalota S.K., Sharma B.D., 2009. Effect of continuous Rice-Wheat Rotation on Soil Properties From Four Agro-Ecosystems of Indian Punjab. - *Communications Soil Science Plant Analysis* 40: 2945-58.
- Singh, K.K., Colvin T.S., Erach D.C., Mughal A.Q., 1992. Tilth index: An Approach Quantifying Soil Tilth. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 35(6): 1777-1784.
- Stegman, E.C., 1986. Efficient Irrigation Timing Methods for Corn Production *Transactions of the ASAE*, 29 (1), 203-210.
- Strudley, M.W., Green T.R., Ascough II, J.C., 2008. Review: Tillage Effects on Soil Hydraulic Properties in Space and Time: State of The Science. *Soil Tillage Res.* 99, 4-48.

- Subbulakshmi, S., Saravanan N., Subbian P., 2009. Conventional Tillage vs Conservation Tillage - a Review. *Agric. Rev.* 30, 56-63.
- Süzer, S., 2003. Mısır Tarımı. Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Edirne.
- Şeker, C., ve Işıldar, A. 2000. Tarla trafiğinin toprak profilindeki gözenekliliğe ve sıkışmaya etkisi. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 24, 71-77.
- Tarawally, M.A., Medina H., Frometa M.E. ve Itza C.A., 2004. Field Compaction at Different Soil-Water Status: Effects on Pore Size Distribution and Soil Water Characteristics of a Rhodic Ferrasol in Western Cuba. *Soil Till. Res.* 76, 95-103.
- Tariq, J.A., Khan M.J., Usman K., 2003. Irrigation Scheduling of Maize Crop by Pan Evaporation Method. *Pakistan Journal of Water Resources*, Vol.7(2) July-December 2003/ 29.
- Tebrügge, F., Düring R.A., 1999. Reducing Tillage İntensity: A Review of Results From A Long-Term Study in Germany. *Soil Tillage Research*, 53: 15-28.
- Thomas, G. A., Vildermuth G. B., Thompson J. P., Standley J. and Blamey F.P.C., 1996. Factors Limiting Wheat Yields Under Zero Tillage in Southern Queensland. *Proceedings of the 8th Australian Agronomy Conference*, Toowoomba, Queensland, Australia, 30 January-2 February, 534-537.
- TUİK, 2019. Bitkisel Üretim İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.

http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001 Erişim tarihi: 09 Temmuz 2025.

- USDA, 2019, World Agricultural Production. United States Department of Agriculture, Foreign Agriculture Service, Circular Series WAP 8-19, August, 2019.
- Wang, X., Li M., Liu S., Liu G., 2006. Fractal Characteristics of Soils Under Different Land- Use Patterns in the Arid and Semiarid Regions of the Tibetan Plateau, China. 134: 56-61.
- Yalçın, H., Demir V., Yürdem H., Sungur N., 1997. Buğday Tarımında Azaltılmış Toprak İşleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Araştırma. Tarımsal Mekanizasyon 17. Ulusal Kongresi, Tokat, 415-423.
- Yıldırım, O., 1993. Bahçe Bitkileri Sulama Teknigi, A.Ü. Zir. Fak., Yayın No: 1281, Ankara, 214.
- Zeren, Y., Işık A., Özgüven F., 1993. GAP Bölgesinde İkinci Ürün Tane Mısır Yetiştirmede Farklı Toprak İşleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması 5. Uluslararası Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi Bildiri Kitabı, Kuşadası.
- Zhang, M.K. ve Fang L.P., 2007. Effect of Tillage, Fertilizer and Green Manure Cropping on Soil Quality at an Abandoned Brick Making Site. Soil and Tillage Research, 93: 87-93.
- Zou, X.Y., Li S., Zhang C.L., Dong G.R., Dong Y.X., Yan P., 2002. Desertification and Control Plan in the Tibet Autonomous Region of China. J. Arid Environ. 51, 183-198.

BÖLÜM 5

MOBİL UYGULAMALAR ve TARIMSAL AMAÇLI KULLANIMI*

Bilg. Müh. Alper BAYRAM

Prof. Dr. Murad ÇANAKCI

GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca teknik alanda yaşanan gelişmelerin hızı sanayi devriminden sonra artmaya başlamıştır. Bu gelişmeler toplumsal hayatımızda büyük değişimlere ve dönüşümlere yol açmaktadır. Bu kapsamda gelişen alanlardan birisi de mobil teknolojilerdir (Vardar, 2016). Akıllı cihazların yaygınlaşmasıyla birlikte kullanımı artan mobil uygulamalar, hızla gelişerek birçok ihtiyaca çözüm sunan araçlara dönüşmüştür. Son yıllarda mobil uygulamaların sosyal ve günlük yaşam, sağlık, eğitim, oyun, teknik destek, haber, ticaret, finans, pazarlama vb. olmak üzere birçok alanda kullanımı hızla artmaktadır (Kumar ve Karthiyekean, 2019).

Mobil uygulamaların kullanımı artan alanlardan birisi de tarımsal üretimdir. Bitkisel ve hayvansal üretime yönelik doğrudan veya dolaylı etkileri olan konular için geliştirilen mobil uygulamaların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Mobil uygulamalar, üretim ve karar alma süreçlerinin kayıt altına alınması ve izlenebilir olmasına katkı sağlamakta, tarımda teknoloji kullanımını kolaylaştırmaktadır.

***Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.**

Bu amaçla geliştirilen mobil uygulamalar ile hava durumu, ürün takibi, çiftlik yönetimi, hayvancılık, hastalık-zararlı teşhis ve takip, sulama-gübreleme ihtiyaç ve takip, çiftçiye özel uygulamalar vb. birçok hizmet sunulabilmektedir. Bu sayede tarımsal faaliyetler daha bilinçli ve planlı şekilde yürütülebilmekte, üretim süreçleri optimize edilerek teknik ve ekonomik yönden sürdürülebilir üretime katkı sağlanmaktadır.

Mobil uygulamaların sahada kullanımı kısaca hastalık teşhisi örneğinde açıklanabilir. Geleneksel yöntemlerle bitki hastalıklarının teşhisi, üreticilerin doğrudan ziraat mühendisi veya uzmana başvurularak yapılmaktadır. Uzmanlar, bitkinin semptomlu kısımlarını inceleyerek veya analizler yaparak tedavi önerilerinde bulunmaktadırlar. Ancak bu yöntem için her zaman yetkin bir uzman bulunamayabilir, teşhis süreci zaman alıcı olabilir (Ramcharan vd., 2019). Bu kapsamda uzman bir ekip tarafından geliştirilen mobil teknolojiler düşük maliyetli, yüksek doğruluk oranına sahip alternatif çözümler sunabilmektedir (Petrellis, 2017). Belirtilen gerekçeler dikkate alınarak akıllı telefonların yaygınlaşmasıyla, bitki ve bitki hastalıklarıyla ilgili çok sayıda uygulama geliştirilmiştir (Prasad, 2013). Bu uygulamalar; bitki ve hastalık tanımlama, hastalık şiddetini tahmin etme, biyolojik bilgi, tarımsal çözümler ve pazar yeri hizmetleri gibi geniş kapsamlı işlevler sunmaktadır. Özellikle görüntü işleme, makine öğrenmesi (ML), derin öğrenme (DL) ve yapay zekâ (AI) teknikleri sayesinde, uygulamalar büyük görsel veri setlerinden yararlanarak hastalıkları daha doğru bir şekilde tanıyabilmektedir (Sujavat ve Kumar, 2022).

Tarımsal amaçlı geliştirilen bilgi ve iletişim teknolojileri için farklı terimlere yer verilmektedir. Bu kapsamda kullanılan başlıca terimler; e-tarım, tele-tarım, m-tarım ve mobil tarımdır. Güncel bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılarak tarımsal amaçlı hizmetlerin verilmesi e-tarım olarak ifade edilmektedir. Tarımsal alanda çalışanlara gerekli olan hizmetleri elektronik haberleşme yoluyla ileten tele-tarım, e-tarımın bir alt koludur. e-tarımın bir diğer alt kolu olan m-tarım, mobil iletişim teknolojileri yardımıyla gerekli tarımsal hizmetleri sunmaktadır. Akıllı telefonlar ve tabletler günümüzde yaygın olarak kullanılan taşınabilir mobil iletişim araçlarıdır. Mobil iletişim teknolojilerinin tarımsal amaçlı yayım faaliyetlerinde kullanılması durumunda m-tarım ile tele-tarım örtüşmektedir. Bir bitkinin fotoğrafı ya da görüntüsü üzerinden hastalığın uzaktan belirlenmesi belirtilen konuya örnek gösterilebilir. Tarımsal hizmetlerin bahsedilen ses ve metin gibi mesajlardan daha ileri düzeyde sunulması mobil-tarım olarak tanımlanmaktadır (Brugger, 2011; Gichamba ve Lukandu, 2012; Hacıyusufoğlu ve Güler, 2016)

Bu çalışmada mobil uygulamaların kısaca teknik yapısı ve tarihsel gelişimine yer verilmiş, Dünya’da ve Türkiye’de tarımsal amaçlı geliştirilen mobil uygulamalara yönelik yapılan bazı akademik çalışmalar incelenmiştir.

1. Mobil Uygulamaların Genel Teknik Özellikleri

Mobil uygulamalar; kullanıcı arayüzü, sunucu ve veri tabanı entegrasyonu, sensör desteği, GPS konumlama, çevrimdışı kullanım gibi teknolojik bileşenlerle çalışmaktadır. Uygulamalar, cihaz üzerinde çalışan bir istemci (client) ile çoğu zaman internet üzerindeki bir

sunucu (server) arasında veri alışverişi yapar. Kullanıcının gördüğü ve etkileşimde bulunduğu ekranlar İstemci tarafını (Frontend) oluşturur. Veri tabanı işlemleri, hesaplamalar, kullanıcı yönetimi gibi arka planda çalışan servisler Sunucu tarafını (Backend) oluşturur. Uygulama ile sunucu arasındaki köprüyü oluşturan taraf Uygulama Programı Arayüzü'dür (API). Bir uygulamanın teknik bileşenleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Mobil Uygulamaların Teknik Bileşenleri

Teknik Bileşen	Açıklama
Mobil İşletim Sistemi	Android veya iOS
Programlama Dilleri	Java/Kotlin (Android), Swift/Objective-C (iOS), Dart (Flutter), JavaScript (React Native)
Veritabanı	MySQL, PostgreSQL SQLite, Firebase
Web Servisi - API	REST, GraphQL ile sunucu ile iletişim
Bulut Entegrasyonu:	Verilerin güvenli saklanması ve cihazlar arası senkronizasyon
Sensör ve Donanım Erişimi	Kamera, GPS, mikrofon, Bluetooth vb.

Bir uygulama; programlama dili (örneğin Java, Kotlin, Swift veya React Native) kullanılarak geliştirilir, ihtiyaçları doğrultusunda tasarlanır ve test edildikten sonra uygun platformlarda yayınlanır. Platform olarak çoğunlukla Android işlemcili telefonlarda Google Play olurken, iOS işlemcili telefonlarda App Store kullanılmaktadır.

Mobil uygulamaların yayınlanma sürecindeki başlıca dört adım aşağıdaki gibidir.

- Geliştirme ve Test
- Mağaza Hesaplarının Açılması
- Uygulama, Paketleme ve Gönderim
- İnceleme ve Yayınlama

2. Mobil Uygulamaların Tarihçesi

Bilgi işlem teknolojilerinin gelişimi özellikle 1950’li yıllardan sonra artmaya başlamıştır. İlk yıllarda büyük boyutlarda (oda büyüklüğünde) olan bilgisayarlar, 1980’li yıllarda kişisel ofis uygulamalarına imkan veren masaüstü bilgisayarlara dönüşmüştür. İnternetin 1990’lı yıllarda kullanılmaya başlanması ile bilgiye erişim hızı artmıştır. Dizüstü bilgisayar kullanımı, hızlı internet, veri paylaşımının kolaylaşması ve iş dünyasının dijitalleşmesi 2000’li yıllardan sonra artış göstermiştir. Sonraki süreçte 2010’lu yıllarda Mobil internet, anlık veri paylaşımı, sosyal medya uygulamaları, bulut tabanlı bilişim, IoT ve yapay zekâ vb. uygulamalar yaygınlaşmıştır. Akıllı telefonlar ve mobil uygulamaların yaygınlaşması da bu dönemde gerçekleşmiştir (Internet Society, 2015; B’Far, 2005). Bu gelişmeler ile bilgi daha erişilebilir hale gelmiş, veri işleme gücü artmış ve mobil çözümler tarım gibi saha odaklı alanlara taşınmıştır (Patterson ve Hennessy, 2005). Akıllı telefon, tablet gibi araçlar için geliştirilen yazılımlar olan mobil uygulamalar, günümüzde pek çok ihtiyaca çözüm sunan araçlara dönüşmüştür. 2000’li yıllardan sonraki gelişim süreci aşağıda başlıklar halinde özetlenebilir.

- 2000’li yılların başı: Bu dönemde mesajlaşma, takvim, not alma gibi temel işlemlere yönelik uygulamalar geliştirilmiştir.
- 2008 : Apple ve Android gibi uygulama mağazalarının açılmasıyla uygulama ekosistemi büyümeye başlamıştır.
- 2010’lar: Uygulamaların alanı genişleyerek harita, banka, sosyal medya, sağlık ve eğitim gibi alanlarda binlerce uygulama geliştirilmiştir.

- 2020 yılı ve sonrası: Yapay zekâ, IoT, bulut ve sensör entegrasyonları ile uygulamalar daha akıllı, kişiselleştirilmiş ve sektöre özel hale gelmiştir.

3. Dünya'daki Tarımsal Amaçlı Geliştirilmiş Mobil Uygulamalar

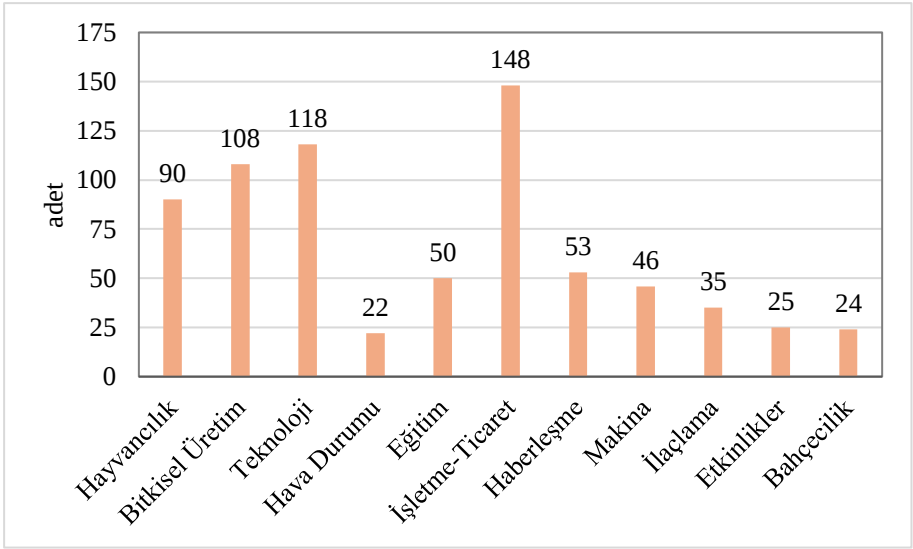
Tarımsal amaçlı mobil uygulamalara yönelik yapılan akademik çalışmalar incelendiğinde, ülkesel ve global düzeyde tarımsal amaçlı geliştirilen mobil uygulamaların dağılımlarının incelendiği, özel alanlar için geliştirilmiş uygulamalara yönelik araştırmalara rastlanılmaktadır.

Tarımsal alanda kullanımlarında artış gözlenen mobil uygulamalarda global trendlerin incelenmesi önemli bir konudur. Bu çalışmalar gelişmelerin seyri ve tercihler hakkında bilgi vermektedir. Barbosa vd. (2020), araştırmalarında serbest erişimli iki platformdaki (Google Play ve Windows Phone) 2015 ve 2018 yıllarındaki değişimleri inceleyen bir alan çalışması yapmışlardır. Uygulama ve ülke sayısı 2015 yılında sırasıyla 244 ve 33 iken 2018 yılında bu sayılar 599 ve 61'e çıkmıştır. En fazla uygulama sayısına sahip ülkeler ABD, Brezilya ve Hindistan'dır. Bu ülkelerdeki uygulama sayısı toplam sayının yaklaşık %64'ünü oluşturmuştur. Birçok magazin ve pazar bilgisine yönelik uygulamanın yanında işletme yönetimi, zararlı ve hastalıklar, hassas tarım ve teknik destek amaçlı birçok sayıda uygulama bulunmaktadır. Bununla birlikte fotoğraflık bilginin de girdi olarak kullanıldığı uygulamalara da rastlanılmıştır. Çalışmada kullanıcılara ücretsiz olarak hizmet sunan mobil uygulamaların kullanımının küresel bazda hızla arttığını belirtilmiştir. Benzer bir

yaklaşımla farklı bir çalışmada tarımsal amaçlı kullanılan mobil teknolojilere yönelik 2014-2024 yılları arasındaki basılan yayınlar incelenmiştir. Bu amaçla; mobil teknoloji, mobil uygulamalar, akıllı telefonlar ve mobil araçlar anahtar kelimeleri ziraat/tarım, yetiştiricilik ve bitkisel üretim kombinasyonları ile SCOPUS veri tabanında yayınlanmış 2570 yayın taranmıştır. Özellikle Hindistan, ABD ve Çin'in lider konumda olan devletler olduğu görülmektedir. Çoğu yayın; kongre bildirisi ve dergi makalesinden (%95) oluşmaktadır. Derleme şeklindeki yayın oranı %5'tir. Çalışmanın başladığı 2014 yılında 61 olan yayın sayısı sürekli artış göstererek 2023 yılında 392 ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Çalışma sonunda gelecekteki çalışmaların, yeni mobil teknolojinin yenilikçi uygulamalarını keşfetmeye ve farklı bölgelerdeki tarımsal uygulamalar üzerindeki gerçek dünya etkilerini değerlendirmeye odaklanmasının gerekliliği belirtilmiştir (Abdullahi vd., 2025).

Kumar ve Karthikeyan (2019), çalışmalarında global ekosistemdeki tarımsal amaçlı yer alan farklı platformlardaki mobil uygulamaları incelemişlerdir. Çalışmada; tarımsal amaçlı mobil uygulamaların tarandığı web sitesinden alınan verilere göre farklı kategorilerde belirlenen 654'ü ücretli ve 92'si ücretsiz olmak üzere toplam uygulama sayısı 746 olarak belirlenmiştir.

Mobil uygulamalar; hayvancılık, bitkisel üretim, teknoloji, hava durumu, zararlı yönetimi, eğitim, işletme-ticaret, haberleşme, makina, ilaçlama (pülverizasyon), etkinlikler ve bahçecilik olmak üzere toplam 12 kategoriye ayrılmıştır. Uygulamaların dağılımları Şekil 1'de verilmiştir.



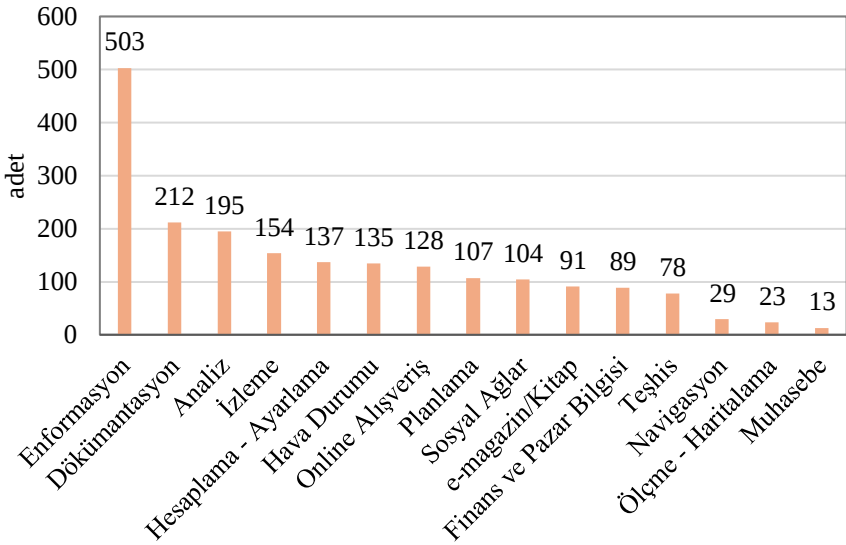
Şekil 1. Tarımsal amaçlı uygulamaların konu bazında dağılımı (Kumar ve Karthikeyan, 2019)

Şekil 1’de görüldüğü gibi en fazla uygulama; işletme, teknoloji, bitkisel ve hayvansal üretim kategorilerinde sırasıyla 148, 118, 108 ve 90 adet olarak belirlenmiştir. Çalışmada; geliştirilecek uygulamaların tüm mobil işletim sistemlerini destekleyecek şekilde programlanması, tüm platformlar üzerinden kullanıma sunulmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır. Aynı zamanda uygulamaların kullanıcı dostu ve tarımsal üretimde yer alan farklı paydaşların da kullanımına uygun olarak geliştirilmesi önerilmiştir.

Benzer bir yaklaşımlar Hanselman vd. (2023), tarafından Almanya pazarında bulunan tarımsal amaçlı yerel mobil uygulamalar analiz edilmiştir. İlgili anahtar kelimeler taranarak toplam 1214 mobil uygulamaya ulaşılmıştır. Uygulamaların %62.3’ü Andorid, %28.5’i iOS tabanlı olarak hazırlanmıştır. Toplam uygulamalar içinde her iki işletim sisteminde hazırlanan uygulama oranı %9.0’dır.

Uygulamaların yazım dili İngilizce, Almanca ya da her ikisine yönelik çok dilli hazırlanmıştır. Tarımsal faaliyet alanları dikkate alındığında bitkisel üretime yönelik uygulama sayısının hayvansal üretime yönelik uygulama sayısından daha fazla olduğu belirlenmiştir. Uygulamalar farklı alanlara (fonksiyon) hizmet verebilmektedirler. Bu durum dikkate alındığında uygulamaların toplam fonksiyon sayısı 1998'e ulaşmaktadır. Almanya'daki yerel uygulamaların fonksiyonlarına göre dağılımı Şekil 2'de görülmektedir.

Fonksiyonlar dikkate alındığında, tüm uygulamalar arasında en yüksek oranla %41.3 (503 adet) enformasyon amaçlı hazırlanmış uygulamaların yer aldığı belirlenmiştir. Enformasyonu dokümantasyon (212 adet) ve analiz grupları (195 adet) takip etmiştir. Uygulama puanlamalarına bakıldığında kullanıcıların büyük çoğunluğunun tarıma yönelik mobil uygulamalardan memnun olduğu ifade edilmiştir. Mobil uygulama pazarının dinamik bir yapıya sahip olduğu ve gelecekte özellikle ahır içi hayvansal üretime yönelik uygulamalara odaklanması gerektiği ifade edilmiştir.



Şekil 2. Tarımsal amaçlı uygulamaların konu bazında dağılımı (Hanselman vd., 2023)

Kambale vd. (2024), büyük çoğunluğunu küçük ölçekli tarımsal işletmelerin oluşturduğu Hindistan’da çiftçiler için geliştirilmiş erişilebilir mobil uygulamaları incelemişlerdir. Çalışmada, tercih edilebilirlik dikkate alınmış, indirme sayısı ve puanlar değerlendirilerek 10 farklı mobil uygulama ayrı ayrı yorumlanmıştır. Ayrıca uygulamaları kullanan toplam 30 çiftçi rastgele seçilerek görüşleri alınmıştır. Çalışmada bilgilendirici, basit ve kullanımı kolay bir uygulama olduğu için Plantix adlı uygulama daha etkin bulunmuştur. Mobil uygulamalar ile elde edilen gerçek zamanlı hava durumu, zararlı kontrol, ürün yönetimi ve pazar fiyatları gibi bilgilerin çiftçilerin önceden bilinçli kararlar almalarını sağlayarak verimliliği artırdığı ve tarımdaki riski azalttığı ifade edilmiştir. Çiftçilerin uygulamalarda karşılaştıkları zorluklar sırasıyla; sınırlı internet

bağlantısı, teknik bilgi eksikliği, dil engelleri, yerleştirilmiş içerik yetersizliği ve yüksek veri maliyetleri olarak belirtilmiştir. Aynı kişiler mobil uygulamalardaki sorunlara yönelik; internet bağlantılarının iyileştirilmesi, kullanıcı arayüzünün basitleştirilmesi, dil engellerinin kaldırılması, yerleştirilmiş içerik yetersizliğinin iyileştirilmesi ve kullanım ücretlerinin uygun hale getirilmesi ya da sponsorlukların sağlanması şeklinde önerilerde bulunmuşlardır.

Siddiqua ve ark. (2022), tarafından yapılan çalışma özel uygulamaların incelendiği bir araştırmaya çalışmaya örnek gösterilebilir. Araştırmada, bitki hastalıklarının teşhis amacıyla geliştirilmiş toplam 17 adet mobil uygulamayı kalite ve sınırları açısından incelenmiştir. Tablo 2’de incelenen uygulamaların meta verileri yer almaktadır.

Geliştirilen uygulamaların çoğunluğu hastalıkların tespit, teşhis ve tedavisinde tam olarak başarılı bulunmamıştır. Genel olarak, mevcut tüm uygulamaların işlevsellik, kullanıcı deneyimi ve yazılım kalitesi yönünden iyileştirmesinin gerekli olduğu belirtilmiş. Bu nedenle, gelecekteki iyileştirmeler için bir dizi tasarım önerisi sunulmuştur. Ayrıca araştırmacılar gelecekte bu konuda yapacakları çalışmaların kapsamı hakkında bilgi vermişlerdir.

4. Türkiye’deki Tarımsal Amaçlı Geliştirilmiş Mobil Uygulamalar

Tarımsal amaçlı geliştirilen mobil uygulamalar incelendiğinde, uygulamaların Dünya’da olduğu gibi Türkiye’de de daha çok özel sektör tarafından geliştirildiği görülmektedir. Bununla birlikte kamu kuruluşları tarafından geliştirilen mobil uygulamalar bulunmaktadır.

Tablo 2. Uygulamaların meta verileri (Siddiqua ve ark.,2022)

Uygulama ismi	Ülke / Bölge	Ücretsiz/ Ücretli	İndirme Sayısı	Platform
Pestoz Identify Plant Diseases	Hindistan	Ücretsiz	10.000+	Android
AgroAI – Plant Diseases Diagnosis Early Access)	Afrika	Ücretsiz	10+	Android
Cropalyser	Hollanda	Ücretsiz	10.000+	Android
PDDApp: Plant Disease Detection	Rusya	Ücretsiz	1.000+	Android
Leafy	Hindistan	Ücretsiz	100+	Android
PlantDoctor	Hindistan	Ücretsiz	1.000+	Android
Plantix – Your Crop Doctor	Almanya	Ücretsiz	100.000+	Android
Plant Disease Detector	Bilinmiyor	Ücretsiz	10+	Android
Riceye	Bilinmiyor	Ücretsiz	5+	Android
Cassava Plant Disease Identify	Bilinmiyor	Ücretli	–	iOS
Plants Disease Identification	Bilinmiyor	Ücretli	–	iOS
Garden Plants Diseases Detector	Bilinmiyor	Ücretli	–	iOS
Plant Disease Identifier	Bilinmiyor	Ücretli	–	iOS
Plant Diseases and Pests	Bilinmiyor	Ücretli	–	iOS
PlantifyDr	ABD	Ücretsiz	10+	Android ve iOS
Leaf Doctor	ABD	Ücretsiz	10.000+	Android ve iOS
Agrio	ABD	Ücretsiz	100.000+	Android ve iOS

Tablo 3’de kısa bir tarama ile elde edilen Türkiye’deki yaygın kullanılan bazı tarımsal amaçlı uygulamalar listelenmiştir.

Tablo 3. Türkiye’de kullanılan bazı tarımsal amaçlı mobil uygulamalar

Uygulama Adı	İndirme Sayısı
Tarım Cebimde	500.000+
İmeceMobil	100.000+
Arppha Çiftçi	100.000+
Deniz’den Toprağa	100.000+
Tarfin	100.000+
Ziraat Çiftçi Platformu	100.000+
Tarlam CepTe	100.000+
Tarım Kredi KORBİS	100.000+
Sütış Çiftliği	50.000+
Tarsim Mobil	50.000+
Gübretaş EGP	10.000+
Orbit Uzaktan Tarla Takibi	10.000+
Hasat Mobil	10.000+
BenimSürüm: Sürü Yönetimi	10.000+

Tablo 3’de yer alan uygulamalar incelendiğinde Dünya’da genelinde olduğu gibi çoğunlukla ücretsiz, iOS ve Andorid tabanlı olduğu görülmektedir. Bazı uygulamalar birden fazla alanda hizmet vermek için geliştirilmiştir. İndirilme sayısı 100.000’i aşan uygulamaların bulunması, ülkemiz çiftçisinin bu konuya ilgisiz kalmadığının bir göstergesi olduğu söylenebilir. İndirilme sayısı 500.000’i aşan Tarım Cebimde adlı uygulama Tarım ve Orman Bakanlığı’na ait bir uygulamadır. Uygulama ile kayıtlı üreticilere kurumsal hizmetin yanında bilgilendirme de yapılmaktadır.

İndirilme sayısı 100.000’i aşan yedi uygulamanın üçü bankalara aittir. Bu uygulamalar ile bankacılık hizmetlerinin yanında bilgilendirme hizmeti sunulmaktadır. Bu grupta yer alan özel bir

uygulama bilgilendirme, teknik destek, pazar fiyatları, dijital arşiv, analiz vb. hizmeti vermektedir. Diğer bir uygulama tarımsal girdileri için alışveriş uygulamasıdır. Bir traktör üreticisine ait diğer bir uygulamada, kullanıcıların tarlalarına özel takip özelliği bulunmaktadır. Kullanıcı sayısı 10.000'i aşan bir uygulama ise üyeler kooperatifçilik hizmetlerinden yararlanmaktadırlar.

Kullanıcı sayısı 50.000'i aşan bir uygulama süt satışı için geliştirilmiş bir uygulamadır. Diğer uygulama ise bilgilendirme ve tarımsa sigortacılık hizmetleri vermektedir.

Sayıları 10.000'i aşan uygulamalar incelendiğinde üç uygulamanın sırasıyla; bitki besleme desteği, uzaktan tarla takibi hizmeti ve bankacılık hizmetleri desteği veren uygulamalar olduğu görülmektedir. Diğer uygulama ise büyükbaş hayvancılık işletmelerine yönelik akıllı hayvancılık için geliştirilmiş bir sürü yönetimi uygulamasıdır.

Tablo 3'de kullanıcı sayısı fazla olan uygulamalar dikkate alınmıştır. Bununla birlikte Türkiye'de geliştirilen uygulamalar incelendiğinde daha az kullanıcı sayısına sahip hastalık ve zararlı teşhis ve takibi, mekanizasyon, hayvansal üretim, ilaçlama, akıllı tarım teknolojileri gibi farklı alanlar için geliştirilmiş birçok uygulama bulunmaktadır.

Ayrıca, akademik çalışmalar kapsamında geliştirilen mobil uygulamalara rastlanılmaktadır. Ancak bu sayıların sınırlı düzeyde kaldığı söylenebilir. Hacıyusufoğlu ve Güner (2016), çiftçilerin ekim ve hasat verimlerinin kayıt altına alındığı, yıllara göre verimlerin görüntülediği ve konumundaki yağış, nem ve sıcaklık bilgisini

öğrenme hizmeti verecek şekilde planlandığı bir mobil uygulama geliştirmişlerdir. Programda çiftçilerin özellikle hangi yılda, hangi üründen, ne kadar verim elde ettiklerini kayıt altına alabilecek bir menü yer almaktadır. Seveli (2023), çalışmasında Tarım 4.0 kapsamında hayvancılık işletmelerine yönelik bir mobil uygulama üzerinde çalışmıştır. Çiftlik İzleme ve Yönetim Sistemi (ÇİYS) adı verilen uygulama bir ekosistem olarak geliştirilmiştir. ÇİYS mobil uygulaması, sahada çalışan veteriner hekim ve kullanıcılara veri kayıt ve çiftlik takibinde kullanım kolaylığı sunan ve ÇİYS web uygulaması ile entegre çalışan bir mobil yazılımdır. Irmak vd. (2021), çalışmalarında Türkiye'deki akıllı telefon uygulamalarının mevcut durumu incelenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise Edirne ili Lalapaşa ilçesinde tarımsal faaliyet gösteren toplam 265 üretici ile anket çalışması yürütülmüştür. Araştırma, Türkiye'de kooperatif ve özel sektör uygulamalarıyla karşılaştırıldığında kamu sektörü tarafından oluşturulan uygulamaların daha fazla olduğu görülmüştür. Üreticilerin kullandığı kamu sektörü uygulamaları arasında; Meteoroloji, Tapu Kadastro Parsel Sorgulama Uygulaması ve e-Devlet Uygulamasının diğer uygulamalara göre daha fazla kullanıldığı tespit edilmiştir. Tarımda akıllı telefon uygulamalarının kullanımı incelendiğinde ve üreticilerin yaş ortalamasının yüksek ve eğitim seviyesinin kısmen düşük olduğu göz önüne alındığında, tarım sektöründe akıllı telefon uygulamalarının yaygınlaştırılması için uygulamalarda bazı düzenlemeler yapılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir. Yapılacak düzenlemeler için görselliğin (video, fotoğraf gibi) ön planda olması, kullanım dilinin kolay olması, güvenlik

nedeniyle mümkünse şifre istememesi veya çok basit bir şifre kullanılması ve program dilinin Türkçe olması gibi önerler sunulmuştur.

Ulusal Tez Merkezi (<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>) web sayfasında (YÖKTEZ) “mobil uygulama” şeklinde tarama yapıldığında toplam tez sayısı 412 olarak ortaya çıkmaktadır. Yürütülen tezler incelendiğinde mobil uygulama konulu ilk tezin 2003 yılında tamamlandığı görülmektedir. Tez sayılarında 2010’lu yıllardan sonraki artış dikkat çekmektedir. Ancak tarımsal alan yürütülen tez sayısı oldukça sınırlı kalmıştır. Tarama yapıldığında üç adet çalışmaya rastlanılmaktadır. Erbay (2019), yüksek lisans tez çalışmasında tarım arazisindeki fidanların gelişim takibi için mobil uygulama tasarlamış ve geliştirmiştir. Diğer bir çalışmada sera otomasyon sistemlerinin kontrolüne yönelik bir mobil uygulama geliştirmiştir (Doğan, 2022). Ömercikoğlu (2023), tarafından yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında Endüstri 4.0 ile akıllı tarım uygulamaları ve veri analizine yönelik bir mobil uygulamanın geliştirilmesi üzerinde çalışılmıştır.

5. Genel Değerlendirme

Dünya’daki uygulamalar incelendiğinde teknoloji ile bitkisel ve hayvansal üretime yönelik uygulamaların fazlalığı dikkat çekmektedir. Bununla birlikte eğitim-öğretim, haber, hava durumu, ilaçlama ve tarım makinaları vb. birçok konuda uygulamalara rastlanılmaktadır. Bazı uygulamaların birden fazla kategoride hizmet sunduğu görülmektedir. Ülkemizde kullanıcı sayıları yüzbinleri aşan mobil

uygulamalar bulunmaktadır ve Dünya’da olduğu gibi çiftlik/işletme yönetimi, eğitim ve kayıt özellikli uygulamaların sayısı daha fazladır. Mevcut durumda, ülkemizde tarımsal üretime yönelik hastalık-zararlı teşhisi, ilaçlama, sürü yönetimi, ortak makine kullanımı vb. daha özel alanlara yönelik, güvenilirliği yüksek ve kullanıcı dostu mobil uygulama sayılarının artması yararlı olacaktır. Bu kapsamda tarımsal üretime yönelik yerli uygulamaların geliştirilmesi ve tanıtımı gibi faaliyetlerin önemi artmaktadır. Bununla birlikte geliştirilen birçok uygulama olması ve bu uygulamalara olan ilginin artmasına karşın, kullanıcıların uygun programları bulması kolay olmamaktadır. Tarama yapıldığında uygulama adları ve tanımlanan kategorilerindeki farklılıklar nedeniyle özellikle teknik konular için geliştirilmiş özel uygulamalara ulaşım zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle araştırmacıların, pazara sunuşmuş tarımsal amaçlı mobil uygulamalara ulaşım konusunda kullanıcılara kolaylık sağlayacak tarama programları geliştirmesinin yararlı olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdullahi H.O., Mahmud, M., Abdul Rahim, E.E. (2025). Mobile technology in agriculture: a systematic literature review of emerging trends and future research directions. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 30(2), 307-315. <https://doi.org/10.18280/isi.300202>
- Barbosa, J.Z., Prior, S.S., Pedreira, G.Q., Motta, A.C.V, Poggere, G.C., Goularte G.D. (2020). Global trends in apps for agriculture. *Multi-Science Journal*, 3(1), 16-20. <https://doi.org/10.33837/msj.v3i1.1095>
- B'Far, R. (2005). *Mobile computing principles*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. ISBN 0-521-81733-1.
- Brugger, F. (2011). *Mobile applications in agriculture*. Syngenta Foundation, Basel, Switzerland. 38 p. https://farm-d.org/wp-content/uploads/2024/03/Syngenta_Report_on_mAgriculture_abridged_web_version.pdf
- Doğan, M.F. (2022). *Mobil Uygulama ile Sera Otomasyon Sistemlerinin Kontrolü* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı. 2022-YL-052, 90 s., Aydın
- Erbay, G. (2019). *Tarım arazisindeki fidanların gelişim takibi için mobil uygulama tasarımı ve geliştirilmesi* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı. 88 s., Kocaeli.

- Gichamba, A., Lukandu, I. A. (2012). A model for designing M-agriculture applications for dairy farming. *The African Journal of Information Systems*, 4(4), Article 1. <https://digitalcommons.kennesaw.edu/ajis/vol4/iss4/1>
- Hacıyusufoğlu, F. Güler E. 2016. *Tarımda mobil uygulamalar* [Tam Metin]. 18. Akademik Bilişim Konferansı, 30 Ocak-05 Şubat 2016, Aydın.
- Hanselmann, T., Gscheidle, M., Hoffmann, C., & Doluschitz, R. (2023). Mobile applications (apps) for agriculture in Germany – a comparative market analysis. *Landtechnik*, 78(1), 1–9. <https://doi.org/10.1515/lt.2023.3284>
- Internet Society. (2015). *Global Internet Report 2015: Mobile evolution and development of the Internet*. Internet Society. 139 p. <https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2022/11/Global-Internet-Report-2015.pdf>
- Irmak, E., Gürel, A., Sarioğlu, M. (2021). Smartphone application in Turkish agriculture sector. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 672-685. <https://doi.org/10.21597/jist.746368>
- Kambale, P., Raj, B. M. D., Patil, D., Ganavi, N. R. (2024). Mobile technology for farmers: an overview of agricultural apps. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 42(9), 75–81. <https://doi.org/10.9734/ajaees/2024/v42i931632>
- Kumar, S.A., Karthikeyan, C. (2019). Status of Mobile Agricultural Apps in the Global Mobile Ecosystem. *International Journal of*

- Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT)*, 15(3):63-74.
- Legg, J. (2012). *Cassava diseases: ecology and control*. In D. Pimentel, *Encyclopedia of Pest Management* (1st ed., P. 2-6). Abingdon: Taylor and Francis.
- Ömercikoğlu, M.A.Y (2023). *Endüstri 4.0 ile Akıllı Tarım Uygulamaları ve Veri Analizi. Mobil Uygulama ile Sera Otomasyon Sistemlerinin Kontrolü* [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı. 34 s., Sakarya.
- Patterson, D.A., Hennessy, J.L. (2005). *Computer and Organization Design. The Hardware/Software Interface*. Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier. USA.
- Petrellis, N. (2017). *A smart phone image processing application for plant disease diagnosis*. 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST). 04-06 May 2017. Thessaloniki, Greece
<https://doi.org/10.1109/MOCAST.2017.7937683>
- Prasad, S., Peddoju, S. K., & Ghosh, D. (2013). AgroMobile: A cloud-based framework for agriculturists on mobile platform. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 59, 41-52. <https://doi.org/10.14257/ijast.2013.59.04>
- Ramcharan A., McCloskey, P., Baranowski, K., Mbilinyi, N., Mrisho, L., Ndalawa, M., Legg, J., Hughes, D.P. (2019). A mobile-based deep learning model for cassava disease diagnosis. *Front Plant Sci.* 20,10, 272. doi: 10.3389/fpls.2019.00272.

- Sevli, O. (2023). Tarım 4.0 Ölçeğinde Bir Dijital Tarım Uygulaması: Çiftlik İzleme ve Yönetim Sistemi. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 2(7), 105-116.
- Siddiqua, A., Kabir, M. A., Ferdous, T., Ali, I. B., Weston, L. A. (2022). Evaluating plant disease detection mobile applications: Quality and limitations. *Agronomy* 2022, 12(8), 1869; <https://doi.org/10.3390/agronomy12081869>
- Sujavat S.G., Kumar, A. (2022). Image-based detection of plant diseases: From classical machine learning to deep learning. *UGC Care Group 1 Journal*, 52 (6-II), 68-72. ANVESAK ISSN: 0378 – 4568
- Vardar, M. (2016). Mobil triyaj. V. Tecim (Editör), *Mobil Uygulamalar* içinde (ss. 13-24). Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Yönetim Bilişim Sistemleri E-Kitap Serisi Seri No: 2, İzmir.

BÖLÜM 6

II. ÜRÜN MISIR YETİŞTİRİCİLİĞİNDE YAPRAK SICAKLIĞI ESASLI OTOMATİK SULAMA SİSTEMİNİN VERİM VE SU KULLANIM ETKİNLİĞİNİN BELİRLENMESİ¹

Akın ÜN*

Ertan KAPLAN

Yusuf İslam KALKAN

Abdulkadir BAL

Ahmet Bedei EMEN

Mustafa GERGER

Abdullah Suat NACAR

Ahmet Tahsin ÖZTAŞ

Eyüp Selim KÖKSAL

GİRİŞ

Dünyadaki tatlı su kaynaklarının yaklaşık %70–71’i tarım sektöründe kullanılmakta, Türkiye’de ise bu oran %77’ye ulaşmaktadır (FAO, 2011). Artan nüfus, iklim değişikliği ve suyun sektörel kullanımındaki rekabet göz önüne alındığında, mevcut su kaynaklarının etkin yönetimi giderek daha kritik hâle gelmektedir. Özellikle yarı kurak iklim kuşağında yer alan bölgelerde su kıtlığı ve düzensiz yağışlar, tarımsal üretimi doğrudan tehdit eden faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle sulama stratejilerinin iyileştirilmesi, sürdürülebilir tarımsal üretimin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir.

Mısır, dünya genelinde hem gıda hem de hayvancılık için stratejik bir ürün olup üretim hacmi bakımından ilk sıralarda yer almaktadır. Ancak mısır bitkisi

¹Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi’nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) poster olarak sunulmuştur.

su stresine karşı oldukça hassastır; kritik fenolojik dönemlerde yaşanan su yetersizliği, tane sayısını ve bin dane ağırlığını azaltarak verimde dramatik düşüslere yol açmaktadır (Değirmenci ve ark., 1998). Özellikle tepe püskülü çıkarma, koçan püskülü ve dane dolumu dönemleri, bitkinin su talebinin en yüksek olduğu dönemlerdir. Bu aşamalarda yaşanan kısa süreli su stresi bile dölleme başarısını düşürerek koçan başına tane sayısında önemli azalmalar meydana getirebilir. Sıcak ve kurak yaz koşullarının hüküm sürdüğü Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ikinci ürün mısır yetiştiriciliğinin kısıtlı süre içinde tamamlanması gerektiğinden, sulama zamanlaması verim üzerinde daha belirleyici hâle gelmektedir.

Sulama zamanının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler; toprak temelli (toprak nemi, tensiyometre ölçümleri), iklim temelli (buharlaşma-pan ölçümü, evapotranspirasyon hesapları) ve bitki temelli tekniklerdir (Çetin ve ark., 1996). Toprak ve iklim verilerine dayalı yöntemler belirli avantajlar sunsa da üretici koşullarında maliyet, uygulama zorluğu veya ölçüm hassasiyeti açısından sınırlılıklar oluşturabilmektedir. Buna karşın bitki temelli göstergeler, su stresini doğrudan bitkinin fizyolojik tepkileri üzerinden değerlendirdiği için sulama ihtiyaçlarının daha doğru belirlenmesine olanak tanır. Yaprak su potansiyeli, stoma iletkenliği ve özsu akışı gibi parametrelerin ölçümü bitki su durumuna ilişkin değerli bilgiler sunsa da pratikte bu yöntemlerin çoğu tarla koşullarında kesintisiz izleme için uygun değildir.

Bu bağlamda yaprak sıcaklığının izlenmesi, pratikliği ve gerçek zamanlı ölçüme olanak tanınması nedeniyle öne çıkan bir bitki temelli yöntemdir. İyi sulanan bitkilerde transpirasyon sayesinde yaprak sıcaklığı çevre sıcaklığına yakın seviyelerde tutulurken, su stresinin başlamasıyla birlikte stomaların kapanması sonucu yaprak sıcaklığı hızla artar. Kızılötesi termometreler ve termal kameralarla yapılan ölçümler, bitkinin su stresini anlık olarak tespit etme imkânı sunmaktadır. Kurak ve sıcak bölgelerde yaprak sıcaklığı ile su stresinin kuvvetli ilişkisi, bu yöntemi hassas sulama yönetimi için cazip kılmaktadır.

Yaprak sıcaklığına dayalı sulama otomasyonu üzerine yapılan çalışmalar, bu yöntemin hem su tasarrufu sağlama hem de verimi koruma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle ABD'de yürütölen araştırmalarda, yaprak sıcaklığı belirli bir eşiğı aştığında sulamayı tetikleyen otomatik sistemlerin, geleneksel ET tabanlı sulamalara göre eşdeğer hatta daha yüksek verim sağladığı bildirilmiştir (Evelt, Howell, Schneider ve Upchurch, 2000). Söz konusu başarı, büyük ölçüde kullanılan sıcaklık eşiğı ile bu eşiğın aşılmasına

izin verilen bekleme süresine bağlıdır (Wanjura, Upchurch ve Mahan, 2000). Literatürde mısır için optimal yaprak sıcaklığının yaklaşık 28°C olduğu ve bu sıcaklığın maksimum fotosentetik etkinlik için kritik eşik olduğu belirtilmektedir (Burke, 1996). Upchurch, Wanjura, Burke ve Mahan (1996) tarafından geliştirilen “Sıcaklık-Süre Eşiği (Temperature-Time Threshold, TTT)” yaklaşımı bu prensibe dayanmakta olup, mısır, pamuk ve soya gibi birçok farklı bitkide başarıyla uygulanmıştır (Nielsen, Hinkle ve Musick, 1987).

Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde ikinci ürün mısırın sıcaklık stresi ve hızlı su kaybına maruz kalması, sulama otomasyonunun bu bölge için stratejik önemini artırmaktadır. Bölgedeki yüksek sıcaklık ve düşük bağıl nem koşulları, bitki su stresinin çok kısa sürede ortaya çıkmasına neden olmakta ve bu süreç verim üzerinde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle yaprak sıcaklığına dayalı otomatik sulama sistemleri, özellikle ikinci ürün mısır yetiştiriciliğinde potansiyel olarak verim artışı, su tasarrufu ve stres yönetiminde avantaj sağlayabilecek yenilikçi teknolojiler arasında değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada; yaprak sıcaklığına dayalı otomatik sulama uygulamalarının verim, su tüketimi, su kullanım etkinliği (WUE, IWUE), 1000 dane ağırlığı, koçandaki dane sayısı ve bitki boyu gibi önemli tarımsal özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bölge koşulları için uygun sulama stratejilerinin belirlenmesine, suyun verimli kullanımına ve sürdürülebilir tarımsal üretim modellerinin geliştirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

1. MATERYAL ve METOD

Elde edilen bulgular, Şanlıurfa koşullarında gerçekleştirilen deneme alanı uygulamaları ve kullanılan yöntemler ışığında yorumlanmıştır. Aşağıda araştırmada kullanılan materyaller ve uygulanan yöntemler ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır.

1.1. Deneme Alanı ve Bitki Materyali

Araştırma, Şanlıurfa ili Harran Ovası’nda GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü’ne ait Talat Demirören Araştırma İstasyonu arazisinde yürütülmüştür (36°42’K, 38°58’D; yükselti 410 m). İklim, yazları sıcak ve kurak, ilkbahar ve sonbahar mevsimleri kısa olan yarı kurak bir iklimdir. Deneme toprakları alüvyal kökenli, profil boyunca killi tınlı bünyededir. Toprakta kil içeriği üst tabakada %50 civarında olup artan derinlikle yüksek kil oranı devam etmektedir. Deneme alanında 0–120 cm profil boyunca tarla kapasitesi %22–27 ve kalıcı solma noktası %11–15 aralığındadır (bu değerler

toprak profilinden alınan örneklerin laboratuvar analizleriyle belirlenmiştir). Arazi hazırlığı kapsamında ekim öncesi toprak goble disk ile işlenip tapan çekilerek ekime hazır hale getirilmiştir.

Denemede kullanılan mısır çeşidi MAY-Agro firması tarafından geliştirilen MAY Capuzi çeşididir. Bu çeşit, FAO 600 olgunlaşma grubunda, ikinci ürün yetiştiriciliğe uygun, yüksek verim potansiyeline sahip hibrit bir mısır çeşididir. Çeşidin çimlenme ve çıkış gücünün yüksek, kök ve gövde sisteminin güçlü olduğu belirtilmektedir. Denemede ekim 13 Haziran 2024 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ekim, 75 cm sıra arası ve 20 cm sıra üzeri mesafe ile 4 sıralı pneumatik ekim makinesi kullanılarak yapılmıştır. Her bir parsel 6 m x 10 m boyutlarında (60 m²) olup 8 sıra bitki içermiştir.

2.1. Gübreleme ve Bakım

Deneme süresince gübre uygulamaları üretici koşullarına benzer şekilde yapılmıştır: ekimde taban gübresi olarak dekara 10 kg P₂O₅ (Diamonyum fosfat formunda) verilmiş, üst gübrelemeler ise çıkış sonrası 2 eşit kısımda toplam dekara 20 kg N olacak şekilde üre formunda uygulanmıştır. Yabancı ot, hastalık ve zararlılara karşı standart tarımsal mücadele yöntemleri uygulanmış, örneğin çıkış sonrası mısırlar ~10 cm boya geldiğinde koçan kurdu zararlısına karşı ilaçlama yapılmıştır.

Hasat olgunluğuna ulaşıldığında 22 Ekim 2024 tarihinde parseller hasat edilmiştir. Hasatta her parselde kenar etkisine karşılık parsel kenarlarındaki bitkiler çıkartılarak ortadaki net bölüm biçilmiş ve dane verimi hesaplanmıştır. Elde edilen dane verimleri %10 tane nemine göre hesaplanmış ve dekara kg olarak ifade edilmiştir.

3.1. Sulama Sistemi ve Sulama Konuları

Ekim sonrası çıkış sağlamak amacıyla bütün parsellere yağmurlama ile can suyu verilmiş, çıkışlar tamamlandıktan sonra parseller damla sulama sistemine aktarılmıştır. Damla lateralleri sıra üzerinde 50 cm damlatıcı aralığına sahip olup her bir damlatıcı debisi 4 L/sa'dır.

Deneme deseni ve sulama uygulamaları: Deneme, tesadüf blokları deneme desenine göre 5 farklı sulama konulu ve 3 tekerrürlü olarak kurulmuştur. Çalışmada ele alınan sulama konuları şunlardır:

- T1 – Otomatik 30°C / 180 dk: Yaprak sıcaklığı 30°C eşiğini kesintisiz 180 dakika aştığında sulama yapılan otomatik damla sulama.

- T2 – Otomatik 30°C / 240 dk: Yaprak sıcaklığı 30°C eşiğini kesintisiz 240 dakika aştığında sulama yapılan otomatik damla sulama.
- T3 – Otomatik 32°C / 180 dk: Yaprak sıcaklığı 32°C eşiğini kesintisiz 180 dakika aştığında sulama yapılan otomatik damla sulama.
- T4 – Otomatik 32°C / 240 dk: Yaprak sıcaklığı 32°C eşiğini kesintisiz 240 dakika aştığında sulama yapılan otomatik damla sulama.
- T5 – Manuel (Kontrol): Konvansiyonel yöntemde sulama. Bu uygulamada sulama zamanları klasik yöntemle evapotranspirasyon hesabına dayalı olarak belirlenmiş ve su uygulaması %100 ET oranında yapılmıştır. Günlük pan evapotranspirasyon değerleri ve bitki gelişim durumuna göre belirlenen kademeli bitki su tüketim katsayıları kullanılarak her sulamada verilecek su miktarı hesaplanmıştır.

Otomatik sulama konularında, deneme arazisine yerleştirilen kızılötesi termometreler vasıtasıyla bitki yaprak sıcaklıkları sürekli izlenmiştir. Otomasyon sistemi, her bir konu için tanımlanan eşik sıcaklık değerinin, belirlenen süre boyunca aşılması durumunda ilgili parselin damla sulama valfini otomatik olarak açacak şekilde programlanmıştır. Örneğin T1 uygulamasında mısır yaprak sıcaklığı 30°C'nin üzerinde ardışık 180 dakika geçirirse sistem o parselde sulamayı başlatmıştır. Sulama esnasında her parselde sulama miktarları iklim istasyonundan alınan ET miktarlarına göre otomatik olarak hesaplanmış ve her vana için ayrı ayrı sulama başlatılmış ve otomatik olarak kapatılmıştır. Otomatik sistemde ilave olarak; ani debi değişimleri olduğunda veya sulama başladığında sorumlu kişinin cep telefonuna uyarı mesajı gönderen bir kontrol modülü entegre edilmiştir. Deneme süresince tüm otomatik uygulamalar, bitkilerin olgunluk dönemine girmesine dek (19 Eylül 2024) aktif tutulmuştur. Hasada yaklaşık üç hafta kala, 19 Eylül'de tüm otomatik konulara son bir kez eşit miktarda su manuel olarak verilerek sistem kapatılmış ve mısırın olgunlaşma döneminde su stresi yaşamadan kuruması sağlanmıştır.

4.1. Veri ölçümü ve değerlendirme

Deneme boyunca yağış kaydedilmemiş olup bitkilerin su tüketimi tamamen sulama ile karşılanmıştır. Her sulama uygulamasında verilen su miktarları, sistem üzerindeki dijital akış ölçerlerle izlenmiş ve kaydedilmiştir. Her bir parsel için toplam uygulanan sulama suyu miktarı (mm olarak) hesaplanmıştır. Ayrıca sezonluk gerçek evapotranspirasyon (ETa), sulama

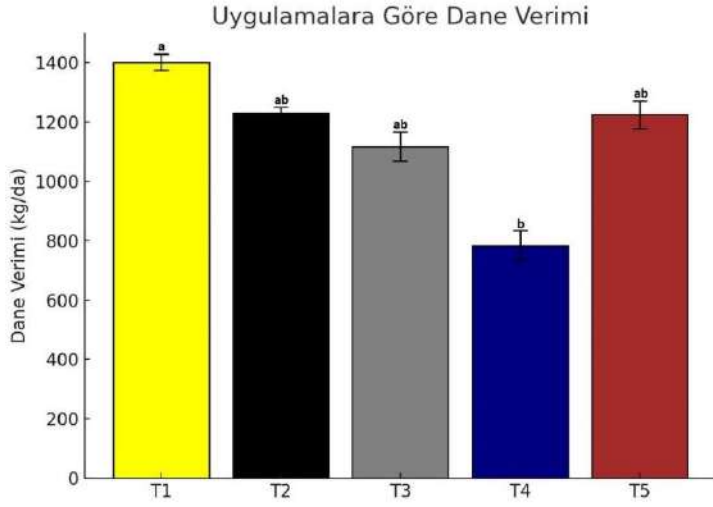
suyu ile toprak profilindeki nem değişimi dikkate alınarak su dengesi yöntemiyle tahmin edilmiştir.

Hasat öncesinde her parselden rasgele örneklenen 5 bitkide bitki boyu ölçülmüştür (toprak seviyesinden başak ucuna kadar, cm). Yine her parselden rasgele alınan koçan örnekleri elle danelenerek koçan başına tane sayısı belirlenmiştir. Danelenen tane örneklerinden alt örnekler alınarak 1000 dane ağırlığı (g) ölçümleri yapılmıştır. Bin dane ağırlığı ölçümü için yaklaşık 1000 adet mısır tanesi tartılmış, ardından bu örnek 65°C’de etüvde sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutularak kuru ağırlık tespiti yapılmış ve değerler standart %15 dane nemine dönüştürülmüştür.

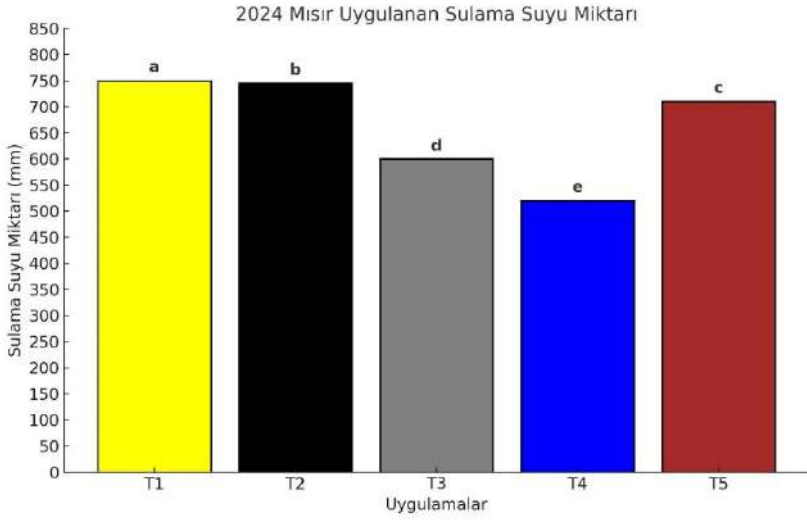
Elde edilen verilerin istatistiksel analizi MSTAT-C yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sulama konularının verim, su tüketimi ve diğer parametreler üzerindeki etkileri tek faktörlü varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Varyans analizinde faktörler arasında fark çıktığında, ortalamaların karşılaştırılması için %5 anlamlılık düzeyinde Tukey çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Ayrıca, su kullanım etkinliği (WUE), birim su tüketimi başına elde edilen verim olarak tanımlanmış ve kg/m³ olarak hesaplanmıştır (dane verimi / ETa). Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE) ise birim sulama suyu başına verim (dane verimi / uygulanan sulama suyu) şeklinde hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalarda dane verimleri kuru ağırlık üzerinden alınmıştır.

2. ARAşTIRMA BULGULARI VE TARTIşMA

Denemeden elde edilen sonuçlar otomatik sulama stratejisinin mısırın verim ve su kullanımı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir ($p < 0.05$). Farklı sulama konularına ait toplam sulama suyu kullanımı, evapotranspirasyon, verim ve diğer gözlenen parametreler Çizelge 1’de özetlenmiştir. Ayrıca, Şekil 1 ve Şekil 2’de seçili uygulamalar için verim ve su tüketimi grafikleri sunulmuştur.



Şekil 1: 2024 yılında farklı sulama konularının mısır dane verimine etkisi (kg/da). 30°C/180dk (T1), 30°C/240dk (T2), 32°C/180dk (T3), 32°C/240dk (T4) ve manuel (T5) uygulamaların ortalama verimleri gösterilmiştir.



Şekil 2: Farklı sulama konularında toplam uygulanan sulama suyu miktarları (mm). T1: 30°C/180dk; T2: 30°C/240dk; T3: 32°C/180dk; T4: 32°C/240dk; T5: Manuel.

Konu Kodları	Konular	Uygulanan Sulama Suyu (mm)	Eta (mm)	Dane Verimi (kg/da)	1000 Dane Ağırlığı (gr)	Koçandaki Dane Sayısı (adet)	Bitki Boyu (cm)
T1	30°C/180 dk	920	894	1400	348.68	451.78	239
T2	30°C/240 dk	844	850	1229	324.49	364.22	235.11
T3	32°C/180 dk	788	753	1117	334.72	298.61	227.89
T4	32°C/240 dk	610	680	784	310.87	373.56	215
T5	Manuel	770	803	1224	363.36	415.56	240.78

Çizelge 1: Sulama konularına göre uygulanan toplam sulama suyu, su tüketimi (Eta), dane verimi ve verim öğeleri sonuçları (2024 sezonu ortalama değerleri).

Tablodaki değerler incelendiğinde, otomatik sulama uygulamalarının su verme sıklığı azaldıkça (eşik sıcaklık yükseltilip süre uzatıldıkça) verimin düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. En yüksek dane verimi T1 konusundan elde edilmiştir (1400 kg/da). T1, yaprak sıcaklığı 30°C eşğine ulaştığında en kısa bekleme süresi (3 saat) sonunda sulama yapıldığından, bitkinin su stresi neredeyse hiç oluşmadığı bir uygulamadır. Bu nedenle T1’de bitkiler maksimum büyüme ve tane doldurma potansiyeline ulaşmış, diğer tüm uygulamalardan istatistiki olarak anlamlı derecede daha yüksek verim vermiştir ($p \leq 0.05$). Öte yandan en düşük verim T4 uygulamasında görülmüştür (~784 kg/da). T4’te yaprak sıcaklığı 32°C’yi aştığında 4 saat gibi uzun bir süre sulama yapılmadan beklendiği için bitkiler ciddi su stresi yaşamıştır. Bu da hem büyüme sürecinde bodur kalmaya (ortalama bitki boyu sadece 215 cm ile en kısa) hem de koçanda dane sayısının azalmasına ve danelerin küçük kalmasına yol açmıştır. Nitekim T4’te dane verimi, T1’e göre yaklaşık %44 oranında daha düşüktür.

Otomatik uygulamalar içinde T2 (30°C/240dk) ve T5 (manuel) benzer düzeyde verim sonuçları vermiştir (~1225 kg/da). İstatistiksel olarak T2 ve manuel uygulama verimleri arasındaki fark önemli değildir. Bu iki uygulamada elde edilen verim, T1’den düşük olmakla birlikte T3 ve T4 uygulamalarından anlamlı düzeyde yüksektir ($p \leq 0.05$). T3 (32°C/180dk) uygulamasında verim 1117 kg/da ile T2 ve T5’ten daha düşük gerçekleşmiş; T3’ün verimi T5’e kıyasla yaklaşık %9 daha az bulunmuştur. Genel olarak verim değerleri sıralaması $T1 > T2 \approx T5 > T3 > T4$ şeklindedir.

Sulama uygulamalarının toplam su tüketimleri incelendiğinde, en fazla sulama suyu T1 uygulamasında kullanılmıştır (toplam 920 mm). Bu değer, en az su tüketen otomatik uygulama olan T4'ün (610 mm) yaklaşık %50 fazlasına denk gelmektedir. T1'de bitkiler su stresine girmeden sık sulandığı için, toplam 24 kez sulama yapılmış ve su tüketimi yüksek olmuştur. T2 uygulamasında toplam 844 mm, T3'te 788 mm su uygulanmıştır. En düşük sulama suyu kullanımı T4'te olup 2024 sezonu boyunca sadece 610 mm su verilmiştir. Manuel sulama uygulamasında ise toplam 770 mm su kullanılmıştır. Manuel yöntemde sulama aralıkları, hava koşullarına bağlı günlük buharlaşma miktarına göre belirlendiğinden, otomatik 30°C/240dk uygulamasına (T2) kıyasla daha az toplam suyla benzer verim elde edilmiştir. Bu önemli bir bulgudur: klasik ET tabanlı sulama yöntemi, bu denemede otomatik 30°C/240dk uygulamasına göre suyu daha verimli kullanabilmiştir. Bunun muhtemel sebebi, otomatik sistemin 30°C eşiğinde 4 saat beklerken, bazen gün ortasında yüksek buharlaşma şartlarında yaprak sıcaklığının kısa sürelerle eşiği aşması sonucu sulama tetikleyerek kısmen gereğinden fazla su uygulamış olmasıdır. Manuel yöntemde ise bitki gelişim katsayısına dayalı planlama, suyun bitki tarafından kullanılacağı zamanlarda sulama yapmaya imkan vermiştir.

Denemede su kullanım etkinliği göstergeleri de sulama konularına göre değişim göstermiştir. Yukarıda tanımlandığı üzere WUE (kg/mm) değeri, 1 mm su tüketimi (ETa) başına elde edilen dane miktarını ifade etmektedir. WUE açısından en yüksek değer T1 uygulamasında hesaplanmıştır (1.57 kg/m³ civarında). Bunu sırasıyla manuel (T5, ~1.52 kg/m³), T3 (~1.48 kg/m³) ve T2 (~1.44 kg/m³) izlemiştir. En düşük WUE ise su stresi altındaki T4 uygulamasında gerçekleşmiştir (1.15 kg/m³). Sulama suyu kullanım etkinliği (IWUE), birim sulama suyu başına verim olarak değerlendirildiğinde T1 ve manuel konular öne çıkmaktadır. T1'de yaklaşık 1.52 kg/m³, manuel uygulamada ise 1.59 kg/m³ verim alınmıştır. T2 ve T3 uygulamalarında IWUE değerleri birbirine yakın olup ~1.42–1.46 kg/m³ düzeyindedir. T4 ise sadece ~1.29 kg/m³ ile en düşük IWUE'ye sahiptir. Bu sonuçlar, en yüksek verimi sağlayan sık sulamalı stratejinin (T1) aynı zamanda birim su başına da en fazla ürün sağlayabildiğini, buna karşılık aşırı su kısıtının uygulandığı T4'ün hem verimi hem de su verimliliğini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Manuel sulama, su kullanım etkinliği bakımından otomatik uygulamalarla rekabetçi bulunmuştur.

Verim bileşenleri incelendiğinde, sulama düzeylerinin mısırın gelişme ve tane özelliklerini etkilediği gözlenmiştir. Bitki boyu, T1 ve T5 konularında

ortalama ~240 cm ile en yüksek ölçülmüş, yeterli su alımının bitki büyümesini teşvik ettiği görülmüştür. En kısa bitkiler ise ciddi su stresi altındaki T4'te kalmıştır (ortalama 215 cm). T3 uygulamasında bitki boyu ~228 cm ile orta değerde olup, T2'de ~235 cm olarak ölçülmüştür (Çizelge 1). İstatistiksel analiz, sulama konusunun bitki boyuna etkisinin %5 düzeyinde anlamlı olduğunu göstermiştir ($p \leq 0.05$). T4 uygulamasındaki bitki boyu, T1 ve T5'e göre anlamlı derecede daha kısa bulunmuştur.

Koçan başına tane sayısı bakımından konular arasındaki farklar önemli düzeydedir ($p \leq 0.05$). En yüksek tane sayılarına T1 ve T5 uygulamalarında ulaşılmıştır (sırasıyla ortalama 452 ve 416 adet/koçan). Bu iki uygulama arasında fark önemsizken, her ikisi de T2, T3 ve T4 uygulamalarından anlamlı şekilde daha yüksek tane sayısına sahiptir. T3 (32°C/180dk) uygulamasında koçan başına tane sayısı en düşük düzeyde kalmıştır (ortalama ~299 adet). Bu dikkat çekici bir sonuçtur; 32°C eşliğinde dahi olsa, sulamanın geciktiği durumda özellikle çiçeklenme döneminde bitki su stresi yaşamış ve döllenme sırasında önemli oranda tane kaybı olmuştur. T4'te ise tane sayısı ortalama 374 adet ile T3'ten yüksek gerçekleşmiştir. T4'teki bitkiler boy ve genel gelişim olarak geride kalmış olsa da bu bitkilerde koçan oluşumu sınırlı olmuş ve az sayıda koçanla daha az fakat nispeten dolu tane oluşmuştur. T3'te ise bitkiler normal koçan oluşturmuş ancak su stresi yüzünden döllenme eksik kalmıştır. Sonuç olarak, su stresi koşullarında mısır bitkisinde koçan başına tane sayısı su eksikliğine karşı en hassas verim unsurlarından biri olarak ortaya çıkmıştır; özellikle başak püskülü döneminde su kısıtı tane bağlamayı belirgin şekilde azaltmaktadır.

1000 dane ağırlığı sonuçları incelendiğinde, sulama uygulamalarının bin dane ağırlığı üzerinde istatistiki olarak anlamlı bir etkisi saptanmamıştır ($p > 0.05$). Bununla birlikte, sayısal açıdan en yüksek 1000 tane ağırlığı manuel sulamada elde edilmiştir (363.4 g). Yeterli suyun temin edildiği T5 ve T1 uygulamalarında daneler daha dolgun ve ağır olurken, su stresi altındaki uygulamalarda nispi düşüşler gözlenmiştir. Özellikle aşırı su stresinin yaşandığı T4 uygulamasında 1000 dane ağırlığı ~311 g ile en düşük değere gerilemiştir. T3 uygulamasında bin dane ağırlığı 334.7 g ile T4'ten daha yüksek olsa da tam sulanan koşullardan düşük kalmıştır (Çizelge 1). Bu sonuç, su stresinin şiddetlendiği koşullarda mısır tanelerinin tam dolgu yapamadığını, özellikle dane doldurma dönemindeki su yetersizliğinin danelerin küçülmesine yol açtığını göstermektedir. Nitekim diğer araştırmalarda da su kısıtının mısır bitkisinde yaprak alanı ve fotosentezi azaltarak dane ağırlığını düşürdüğü bildirilmiştir (Song ve ark., 2019).

Bu araştırmadan elde edilen bulgular, yaprak sıcaklığı eşik değerlerine dayalı otomatik sulamanın mısır tarımında etkin bir sulama yönetimi aracı olabileceğini göstermektedir. Tam sulama koşullarını temsil eden 30°C/180dk uygulaması (T1), mısırdaki potansiyel verimi maksimize etmiştir. 1400 kg/da düzeyindeki dane verimi, ikinci ürün koşullarında oldukça yüksek bir değerdir ve bitkinin suya hiç stres girmeden yetişmesiyle mümkün olmuştur. Literatürde, yaprak sıcaklığına dayalı otomatik sulama uygulamalarının benzer şekilde yüksek verimler sağlayabildiği rapor edilmektedir. Örneğin Texas koşullarında otomatik sulama ile mısırdan yaklaşık 940–1350 kg/da verim elde edildiği, bunun klasik %100 ET sulama ile benzer veya daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Evelt ve ark., 2000). Bu çalışmada ise T1 uygulamasıyla elde edilen ~1.4 ton/da verim, sulama sezonunun uzunluğu ve çeşidin yüksek potansiyeli ile ilişkili olarak bu değerlerin dahi üzerine çıkmıştır. Bu durum, yaprak sıcaklığına göre sulamanın doğru ayarlanması halinde bölgemiz koşullarında mısırın genetik verim potansiyelinin tam olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle mısır için literatürde optimal yaprak sıcaklığı olarak ifade edilen ~28°C eşiğinin (Burke, 1996) yakınlarında (bu çalışmada 30°C) sulama tetiklenmesi, bitkinin fotosentez ve büyüme için en uygun sıcaklık aralığında kalmasını sağlamaktadır. Burke (1996) tarafından tanımlanan “termal kinetik pencere” kavramına göre 28°C civarı, mısır enzimlerinin en verimli çalıştığı sıcaklıktır; dolayısıyla yaprak sıcaklığının bu değeri aşmasına izin vermeyecek bir sulama stratejisi, bitkiyi sürekli optimum koşullarda tutarak verimi artırmaktadır.

Öte yandan, daha yüksek yaprak sıcaklığı eşik değeri (32°C) kullanmanın ve daha uzun süre sulamayı geciktirmenin bitki üzerinde belirgin stres oluşturduğu görülmüştür. T3 ve özellikle T4 uygulamaları, bitkinin bir ölçüde su sıkıntısı çekmesine müsaade ederek su tüketimini azaltmayı hedeflemiştir. Elde ettiğimiz sonuçlar, bu stratejinin verimde kayıplar getirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. T4 uygulaması, su tüketimini T1’e göre %34 azaltmasına karşın verimi %44 oranında düşürmüştür (770’den 440 kg/da kayıp). Bu orantısız verim kaybı nedeniyle su kullanım etkinliği de düşmüştür. Benzer şekilde T3 uygulamasında da, T1’e kıyasla su tüketimi %14 azalırken verim %20 azalmıştır. Bu durum, su kısıtlamasının belirli bir eşiğin ötesinde verim üzerinde orantısız bir olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Nitekim Evelt ve arkadaşlarının (2000) çalışmalarında da mısır için yaprak sıcaklığı eşiğinin yükseltilmesi veya eşik süre uzatılması, maksimum verimden uzaklaşıp maksimum su verimliliğine yaklaşan sonuçlar doğurmuştur. Yani çiftçi hedefe göre eşiği ayarlayarak ya verimi ya su tasarrufunu artırabilir.

Ancak bizim bulgularımız, aşırı su tasarrufu odaklı stratejilerin (32°C, 240 dk gibi) pratikte ne verim ne de su verimliliği açısından tercih edilir olmadığını göstermektedir. 32°C/240dk uygulaması, beklenenin aksine su kullanım etkinliğini de düşürmemiştir; çünkü bitki aşırı strese girince toplam su tüketimi de düşmüş, ancak verim orantısız azaldığından birim suya düşen ürün miktarı gerilemiştir. Bu bulgumuz, “sulama aralığını fazla uzatmanın mısır üretiminde su kullanım verimliliğini artırmada etkili olmadığı” yönündeki proje öngörüsüyle de uyumludur(Anonim, 2024).

Denememizde manuel sulama yöntemi, otomatik 30°C/240dk uygulamasına kıyasla daha az su ile benzer verim sağlaması bakımından dikkat çekicidir. Genellikle araştırmalar, otomatik bitki sensörlü sistemlerin geleneksel yöntemlere göre ya benzer verimle daha az su kullanarak daha yüksek su verimliliği sağladığını (Evelt ve ark., 2000) veya aynı suyla daha yüksek verime ulaştığını göstermektedir(Howell ve ark., 2000). Bu çalışmamızda manuel (ET esaslı) yöntem, 30°C eşliğinde 4 saat gecikmeli otomatik sistemden yaklaşık %9 daha az su ile aynı verimi almıştır. Bu sonuç, iyi planlanmış bir ET tabanlı sulama programının da oldukça etkin olabileceğini göstermektedir. Nitekim T1 uygulamasında sezon toplamında verilen su, hesaplanan ETa'den ~26 mm fazladır (Çizelge 1), bu da bir miktar suyun drenajla kaybedildiğine işaret eder. Manuel yöntemde ise sulamalar daha optimum miktarlarda yapıldığından ETa ile uygulanan su hemen hemen çakişmıştır (770 mm su, 803 mm ETa).

Ancak otomatik sistem ile manuel yöntemi karşılaştırırken, otomasyonun avantajlarının altını çizmek gerekir. Otomatik sistem, bitkinin su ihtiyacını gerçek zamanlı olarak algılayıp sulamayı devreye sokarak, olası insan hatalarını ve iş gücü ihtiyacını azaltmaktadır. Ayrıca beklenmedik sıcak hava dalgası gibi durumlarda anında reaksiyon verebilmekte, bu sayede strese girmeyi önlemektedir. Manuel yöntemde ise sulama periyodu sabit olup, aşırı sıcak bir hafta veya daha serin bir dönem ayrımı yapmaksızın belirlenen rutinde devam edilir. Denemede bu durum her ne kadar verim üzerinde olumsuz gözlenmese de, uzun dönemde otomasyonun değişken iklim koşullarına daha adaptif olacağı açıktır.

Verim öğelerinin sonuçları incelendiğinde, literatürde bildirilen su stresi etkileriyle uyumlu bulgular elde edilmiştir. Su stresinin özellikle koçandaki tane sayısını azalttığı net bir şekilde görülmüştür. Başaklanma ve dölleme döneminde su yetersizliği, polen yaşam süresini ve dişi çiçek tüylerinin tepkisini olumsuz etkileyerek döllemiş tane sayısını düşürmektedir. Song ve

ark. (2019) tarafından yürütölen detaylı bir saha çalışmasında, mısıır bitkisinin vejetatif dönemdeki şiddetli su kısıtının bile yaprak alan indeksini ve dolayısıyla sonraki generatif büyümeyi azalttığı, bunun sonuçta tane ağırlığını ve verimi düşürdüğü gösterilmiştir(Song ve ark., 2019). Bu alışmada T3 uygulamasında belirgin biçimde düşük tane sayısı, tam da su stresinin döllenme üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Öte yandan, T4 uygulamasında tane sayısı nispeten yüksek kalmış ancak bin dane ağırlığı çok düşmüştür. Bu da, T4'te belki döllenme başlangıçta fena olmayıp çok sayıda tane tutumu olsa da, devam eden su stresi nedeniyle doldurulamayıp cılız taneler kaldığını düşündürmektedir. Bu durum literatürde, dane doldurma dönemindeki su stresinin tane ağırlığında günlük %3-5 civarında azalma yaratabileceğı şeklinde rapor edilmektedir(akir, 2004; Payero ve ark., 2006)..

Sonuç olarak, yaprak sıcaklığına dayalı otomatik sulama ile mısıır bitkisinin su stresi göstergeleri başarılı şekilde izlenmiş ve farklı eşik senaryolarının hem su tüketimi hem verim üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, bu teknolojinin doğru kullanıldığında şanlıurfa gibi yarı kurak bölgelerde su tasarrufu ve verim artışı sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle 30°C yaprak sıcaklığı eşiğı ve 180 dakika gecikme süresi, bu çalışmada en yüksek verim ve aynı zamanda en yüksek su kullanım verimliliğı değerlerini sağlamıştır. Daha yüksek eşik değerler ise verimde azalma pahasına su tüketimini azalttığından, üreticinin hedeflerine göre dikkatli seçilmelidir. Eğer amaç maksimum verim ise yaprak sıcaklığı eşiğinin nispeten düşük tutulup bitkinin stres yaşamasına izin vermeyen bir otomasyon stratejisi (örneğin 30°C) önerilmektedir. Öte yandan su kısıtlı durumlarda belli ölçüde su tasarrufu için eşik sıcaklık bir miktar artırılabilir (örneğin 32°C), ancak çalışmadan elde edilen sonuçlar 4 saat gibi uzun gecikmelerin su verimliliğini ile birlikte birim alandan elde edilen verimi düşürebileceğini göstermiştir. Dolayısıyla 32°C eşik kullanılacaksa dahi bekleme süresinin 3 saati aşmaması uygun görünmektedir.

3. SONUÇ

İkinci ürün mısıır yetiştiriciliğinde yaprak sıcaklığına dayalı otomatik sulama sistemi, geleneksel yöntemle benzer veya daha yüksek verim seviyelerine ulaşabilecek bir performans sergilemiştir. Özellikle yaprak sıcaklığı 30°C eşiğinde ve 180 dakika gecikme ile çalışan otomatik sulama, en yüksek verimi (1400 kg/da) sağlamış; bu verim, klasik manuel sulama ile elde edilen verimin yaklaşık %15 üzerindedir. Bu koşulda mısıır bitkileri, büyüme süresince su stresine maruz kalmamış ve optimum gelişim göstererek maksimum dane

verimine ulaşmıştır. Otomatik sistemin sık sulama yaptığı bu senaryoda sezonluk su tüketimi kontrol grubuna göre daha yüksek olsa da (T1: ~920 mm, Manuel: 770 mm), birim su başına alınan verim açısından bakıldığında T1 uygulaması T5 (manuel) uygulamadan sonra en yüksek değerleri vermiştir (IWUE ~1.52 kg/m³).

Yaprak sıcaklığı eşik değerinin yükseltilmesi (32°C) ve sulama gecikme süresinin uzatılması (240 dk), beklendiği üzere su kullanımını azaltmış ancak verimde belirgin düşümlere yol açmıştır. En kısıtlı sulama stratejisi olan 32°C & 240 dk uygulaması, sadece ~610 mm su kullanarak su tasarrufu sağlarken, verimi 784 kg/da ile kabul edilemeyecek düzeyde düşürmüştür. Bu durumda su kullanım etkinliği de olumsuz etkilenmiştir. Benzer şekilde 32°C & 180 dk uygulamasında da verim kaybı (%9–20 arası) su tasarrufuna kıyasla daha yüksek oranlı gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, fazla stres altındaki uygulamaların mısırdaki ne ekonomik ne de agronomik açıdan avantajlı olmadığı saptanmıştır. Bunun yerine, 30°C yaprak sıcaklığı eşiği ile çalışan otomatik sistem, hem yüksek verim almayı hem de suyu geleneksel yöntemle yakın verimlilikte kullanmayı mümkün kılmıştır.

Araştırma bulguları, yaprak sıcaklığına dayalı otomatik sulamanın Güneydoğu Anadolu koşullarında uygulanabilir ve faydalı bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Bu sistem ile üreticiler, tarlada sürekli gözlem yapmaksızın bitkinin su ihtiyacını anlık olarak takip edebilecek ve sulamayı hassas bir şekilde zamanlayabilecektir. Böylece su stresi kaynaklı verim kayıpları önlenirken gereksiz su kullanımının da önüne geçilecektir. Özellikle suyun kısıtlı olduğu ve her damlasının önemli hale geldiği bölgemizde, bu tür akıllı sulama otomasyonları hem su tasarrufu hem de sürdürülebilir tarımsal üretim açısından önemli katkılar sunacaktır. Gelecekte farklı bitkiler ve iklim koşulları için de benzer teknolojilerin uyarlanması ve yaygınlaştırılması, ülkemiz tarımında suyun verimli kullanımını teşvik edecektir.

KAYNAKLAR

- Anonim. (2024). GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü, “II. Ürün Mısır Yetiştiriciliğinde Sulama Otomasyonunun Geliştirilmesi ve Etkinliğinin Belirlenmesi” proje gelişme raporu. Şanlıurfa.
- Burke, J. J. (1996). Temperature response of plant biological processes: Thermal kinetic windows. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 15(5–6), 385–398.
- Çakır, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1–16.
- Çetin, Ö., Gündüz, M., & Bilgel, L. (1996). Harran Ovası koşullarında II. ürün mısır su gereksinimi. *Köy Hizmetleri Şanlıurfa Araştırma Enstitüsü Yayınları*.
- Değirmenci, V., Gündüz, M., & Kara, C. (1998). GAP bölgesi Harran Ovası koşullarında II. ürün mısırın su-verim ilişkileri. *Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Yayınları*.
- Evett, S. R., Howell, T. A., Schneider, A. D., & Upchurch, D. R. (2000). Automatic irrigation scheduling using feedback from canopy temperature measurements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(6), 316–323.
- FAO. (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A., & Schneider, A. D. (2000). Evapotranspiration of corn—Southern High Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(1), 1–6.
- Nielsen, D. C., Hinkle, S. E., & Musick, J. T. (1987). Effects of soil water potential and plant water stress on the canopy temperature of corn. *Agronomy Journal*, 79(2), 239–243.

- Payero, J. O., Melvin, S. R., Irmak, S., & Tarkalson, D. (2006). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 84(1–2), 101–112.
- Song, Q., Zhang, G., Zhu, X., Chen, Y., Gao, H., & Ma, L. (2019). Effect of water stress on maize growth, yield and water use efficiency under different planting patterns. *Agricultural Water Management*, 222, 122–131.
- Upchurch, D. R., Wanjura, D. F., Burke, J. J., & Mahan, J. R. (1996). Biologically identified optimal temperature interactive console (BIOTIC) for managing irrigation. *Agricultural Water Management*, 31(1–2), 173–190.
- Wanjura, D. F., Upchurch, D. R., & Mahan, J. R. (2000). Control of irrigation scheduling using temperature-time thresholds. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1343–1351.

BÖLÜM 7

ISITMA MERKEZİNİN ATIK ISININ ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ KULLANILARAK TERMODİNAMİK ANALİZİ: MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ SERA ÖRNEĞİ¹

Dr. Öğretim üyesi Abdulkadir AYANOĞLU

* Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacı hayatın tüm alanlarına girmiş bulunmaktadır. Özellikle Isıtma, soğutma ile beraber elektrik gereksinimi en ileri düzey ihtiyaçlardandır. Fosil yakıtlarının azalmasından ötürü; yenilenebilir enerji kaynakları başta önemli bir konu haline gelirken; yenilenebilir enerji kaynaklarının yetmeyeceği öngörüldüğünden dolayı atıklardan ve atık ısı enerjilerinin de kullanılmasına sebep olmuştur (Ata ve ark.,2022).

Atık ısı kullanımında ısının kullanımı için farklı dönüşüm sistemleri kullanılmaktadır. Organik Rankine Çevrimi ise (ORÇ) yüksek sıcaklıkta bir ısı kaynağından enerji alınarak hem elektrik enerjisine hem de soğutma veya ısıtmaya kullanılmak için bir dönüşüm teknolojisidir. Diğer yenilenebilir kaynakları ile beraber biyokütle ve atık ısılar ORÇ’de kullanılabilir. Bu tür çevrimlerin “Organik” olarak adlandırılmasının ve diğer Rankine Çevrimlerinden ayıran özellik ise buhar-su akışkanı yerine organik akışkanların yani "İzantropik tür akışkanların" kullanılarak, akışkanın az ısınması sağlanarak daha yüksek enerji taşımalarıdır (Anonim, 2025).

Literatürde yapılan çalışmalarda, Isıl kaynak olarak fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları ile atıklardan elde edilen ısının bir akışkan vasıtasıyla (hava, azot, helyum, R245fa vb.) ORÇ’de kullanılır. Düşük sıcaklıkta atılan ısının bir enerji kaynağı olmasından ötürü önemli bir enerji potansiyelene sahiptir (Traverso, 2006).

¹Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi’nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.

Demirçelik fabrikasında ki atık ısının ORÇ’de Termodinamik analizi R245fa akışkanı vasıtasıyla yapılarak; buharlaştırıcı basıncının Termodinamik verimliliği üzerinde yüksek bir etkisi var olduğunu hesaplanmıştır (Kaşka, 2014).

Bir güç üretim tesisinde S-CO₂ kullanılarak birbirinden farklı gaz türbin sistemleri karşılaştırılarak, reküperatörün ara soğutucuya göre daha etkin olduğunu termal verim ve toplam güç üretim değerlerinin sonucuna tespit etmişlerdir (Kim, 2016).

Biyokütle ORÇ güç santralinde farklı organik akışkanlar kullanımında en yüksek sıcaklık sırayla 300 °C ve basınç aralığının 0,9-1,5 MPa arasında olduğu tespit edilmiştir (Drescher, 2007)

ORÇ’nin farklı alanlarda özellikle düşük sıcaklıktan farklı organik akışkanlarının termodinamik ve fiziksel özellikleri ile türbin tiplerinin farklı dizaynı neticesinde sistemlerinin etkileri karşılaştırılarak yüksek verimi incelemişlerdir R245fa gazı için yapılan ORÇ sisteminde % 9 verimin artış ile 1,2 kW güç üretimi sağlanmıştır (Hung, 2024, He, 2014, Andreasen, 2015)

n-Pentan (R601), R601a, Bütan, R245ca ve R245fa akışkanları ile izentropik olan R142b, İzobütan,

R600a, R141b, ve R123, R600, R600a, R245fa ve R601 akışkanları bir sistemde kullanılarak farklı teorik analizler yapılmıştır (Masheiti,2011, Long, 2014, Cihan, 2014)

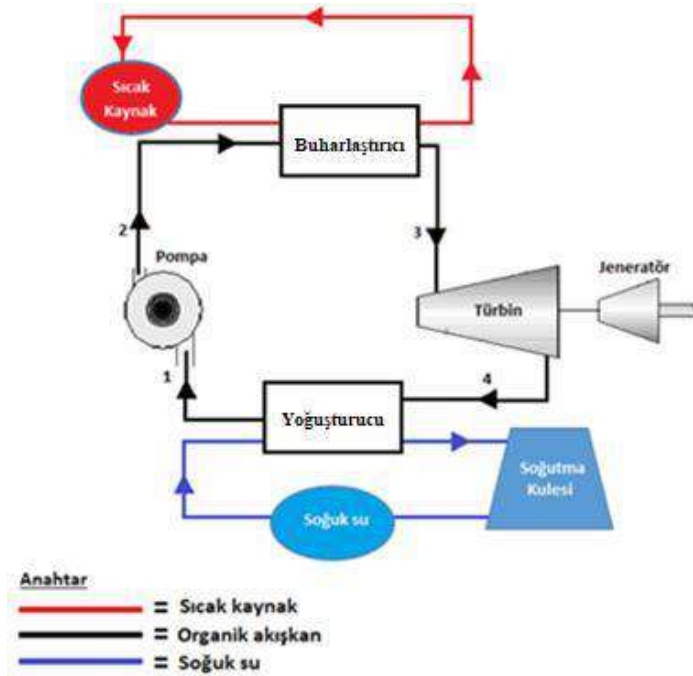
ORÇ’de kullanılan çeşitli akışkanların türbinin giriş sıcaklığında ve verime etkisinin yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca izantropik akışkanın ıslak akışkandan daha fazla verimli olduğunu tespit edilmiştir (Javanshir, 2017).

Bu çalışmada termodinamik formüllerinin analizi için Engineering Equation Solver (EES) paket programı kullanılarak Mardin Artuklu Üniversitesi Isı Merkezinden atılan ısının ekonomizerden geri dönüştürülerek Organik Rankine Çevriminde kullanılarak kurulacak Seranın ısıtılması öngörülmektedir.

1. Materyal ve Metod

Bu çalışmada Engineering Equation Solver (EES) ile beraber sistem içerisinde R32 akışkanı kullanılarak ORÇ’nin analizi yapılmıştır. EES hem termodinamiksel hemde optimizasyon yapacak bir kütüphane ve analiz sonuçları elde edilebilir.

Şekil 1’de ORC şu kısımlardan oluşmaktadır: Türbin, Pompa, Buharlaştırıcı ve Yoğuşturucu. Şekil 1’de ORÇ şematik olarak çizilmiştir. ORC’de kapalı sistem olmasından dolayı organik bir akışkan pompa vasıtasıyla devri daim ettirelerek, başta buharlaştırıcıya gönderilerek ısı değiştirici vasıtasıyla sıcak kaynak olan Ekonomizerden alınan ısı Buharlaştırıcıdan akışkana transfer edilir. Buharlaştırıcıdan sonra akışkan yüksek sıcaklık ve basınca sahip olarak Türbine giriş yaparak enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Geri kalan enerji ise yoğuşturucudan kuyuya atılarak akışkan sıvıya dönüştürülerek pompaya giriş yapar (Ergün, 2016).



Şekil 2.1. ORÇ Sistemi [1].

ORÇ sistemi için kabuller şunlardır (Abuşoğlu, 2016).

Bütün prosesler kararlı şartlardadır.

- Buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.

- Analizde kullanılan tüm bileşenler adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzey ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

1.1. Termodinamik Analiz

Isı bütün enerji sistemlerinin temeli olmakla beraber hayatın vazgeçilmezidir. Enerji formülleri ise enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılmak nedenle, enerji denklıklarına ek olarak enerji verimlilik formülleri ile sistemin verimliliği tespit edilir (Bejan ve ark., 1996).

Termodinamik I. Kanunun Enerji ve Kütle dengesi olup miktara odaklanır. Enerjinin kalitesi ise Termodinamik II. Kanun olan ekserji ile yani değeri (kalitesi) olma, bir nevi “faydalı bir şeyler yapma” potansiyeli ile tanımlanır. Enerjinin kalitesi ise ekserji terimi ile ifade edilmektedir (Abuşoğlu, 2008).

Ekserji, ısı transferinin sanki-denge halinde gerçekleşmesiyle faydalı işin teorik olarak maksimum değeri olarak tanımlanır. Her gerçek enerji dönüşüm sistemleri tersinmez olup bir kısım ekserji yok olmaktadır. Enerji denklıkları ile kütle denklıkları enerji sistemlerinde analiz için kullanılmaktadırlar (Wylen, 1985).

1.1.1 Kütle dengesi

Kütlenin korunumu herhangi bir kütle kaybı olmadıkça sabit kalmasıdır. Yani giriş kütlesi çıkış ve sistemden kalan kütleyle eşit olmalıdır [18].

$$\sum \dot{m}_g - \sum \dot{m}_\chi = \frac{dm_{sistem}}{dt} \quad (2.1)$$

Giriş ve çıkış durumları için g ve ç alt simgeleri kullanılır. Kütle korunum denklemi ile sürekli akış durumunda yeniden aşağıda tanımlanmıştır (Çengel, 2011).

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\chi \quad (2.2)$$

1.1.2 Enerji dengesi

Termodinamik I. Kanunu ne enerjinin yoktan varedilebileceğini ne de yok edilebileceğini ifade ederken; bir halden diğer hale dönüşebileceğini söylemektedir. Enerjinin korunumuna göre: net enerji değişimi çıkan toplam enerji ile giren enerjinin farkıdır (Çengel, 2011):

$$\dot{E}_g - \dot{E}_\chi = \Delta \dot{E}_{sis} \quad (2.3)$$

Sürekli akış enerji girdisi çıktısına eşit olmaktadır (Çengel, 2011):

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\chi \quad (2.4)$$

Enerji ısı, iş ve kütle ile transfer edilebileceği sabit akışlı bir sistem için yukarıda ki formüllere göre tekrar formülize edilince aşağıda ki denklem elde edilmektedir (Çengel, 2011):

$$\dot{Q}_{gir} + \dot{W}_{gir} + \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) = \dot{Q}_{çık} + \dot{W}_{çık} + \sum \dot{m}_\chi \left(h_\chi + \frac{V_\chi^2}{2} + gz_\chi \right) \quad (2.5)$$

Kontrol hacmine giren ve çıkan h_g , h_χ , V_g , V_χ , z_g , z_χ sırasıyla kütle, entalpi, hız ve yüksekliği ifade eder.

1.1.3 Ekserji dengesi

Termodinamik analizlerde verimsizliklere sebep durumları anlamak lazım olup, gerçek enerji dönüşüm süreçlerindeki etkisini toplam verimdeki süreçleri tanımlar. Yapılan çalışmalarda teknolojik olarak kullanılan sistemler verimsizliklerin bir kısmını azaltılabilmektedir. Doğru tanımlanan ekserji verimlilikleri, sistemin performansını net bir şekilde belirtir (Çengel, 2011):

1.1.3.1 Referans ortamı ve ekserji bileşenleri

Termodinamik tanımlarında bulunan ortam bir sistemden diğer sisteme ısı, madde veya herhangi birinin transferinde kullanılabilecek sıcaklık ve basıncın (T_0, P_0) alt indisli o olacak şekilde tanımlanır. Literatürde referans ortam veya termodinamik ortam denilir. T_0 ve P_0 sırasıyla 25 °C ve 1 bar gibi standart değerler kabul edilir. Fakat farklı ortam şartları ve uygulamalarıyla farklı değerlerle tanımlanabilir. Kimyasal bileşenlerin reaksiyonun gerçekleştirmemesi durumunda ekserjisi sıfır kabul edilmektedir. Ortam ise termal sistemin ve çevre bütünlüğünün bir parçası olarak kabul edilir (Scott,2007).

Toplam sistem ekserjisi (Ex_{sis}), fiziksel ekserji Ex_{sis}^{fz} , kinetik ekserji Ex^{kn} , potansiyel ekserji Ex^{pt} ve kimyasal ekserji Ex^{km} olmak üzere 4 kısımdır (Çengel, 2011):

$$Ex_{sis} = Ex_{sis}^{fz} + Ex^{kn} + Ex^{pt} + Ex^{km} \quad (2.6)$$

Kütleli olarak özgül ekserji ise ψ_{sis} olarak tanımlanır (Çengel, 2011):

$$\psi_{sis} = \psi_{sis}^{fz} + \psi^{kn} + \psi^{pt} + \psi^{km} \quad (2.7)$$

Kapalı sistemin fiziksel ekserji ise şu şekilde tanımlanır.

$$Ex_{sis}^{fz} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.8)$$

U, V ve S ise iç enerji, hacim ve entropiyi demektir. Alt indis ise 0 referans ortam demektir. Fiziksel ekserji $\dot{Ex}^{fz}$ oranı ise:

$$\dot{Ex}^{fz} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.9)$$

h ve s entalpi ve entropiyi olup, alt indis ise 0, T_0 sıcaklığı ve P_0 basıncı referans olarak gösterir. Termal ekserji ise $\dot{E}x^t$ ve mekanik ekserji ise $\dot{E}x^m$ toplamıdır (Çengel, 2011):

$$\dot{E}x^{fz} = \dot{E}x^t + \dot{E}x^m \quad (2.10)$$

Spesifik termal ve mekanik ekserjini hesabı ideal gazlar ve sıkıştırılamaz sıvılar için formülü aşağıdadır (Çengel, 2011):

$$\psi^t = \int_{T_0, P_0}^{T_0, P} c \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) dT \quad (2.11)$$

$$\psi^m = \int_{T_0, P_0}^{T_0, P} v dP \quad (2.12)$$

v spesifik hacmi için akışkanın T sıcaklığı ve P basıncı özgül termal ekserjisi formülü şudur [18]:

$$\psi^t = \psi^{fz}(T, P) - \psi^{fz}(T_0, P) \quad (2.13)$$

Mekanik ekserji ise:

$$Ex^m = Ex^{fz} - Ex^t \quad (2.14)$$

Kinetik ve potansiyel ekserjiler ise kendi enerji formüllerine eşittir.

$$Ex^{kn} = \frac{1}{2} m \overrightarrow{v^2}$$

(2.15)

$$Ex^{pt} = mgz$$

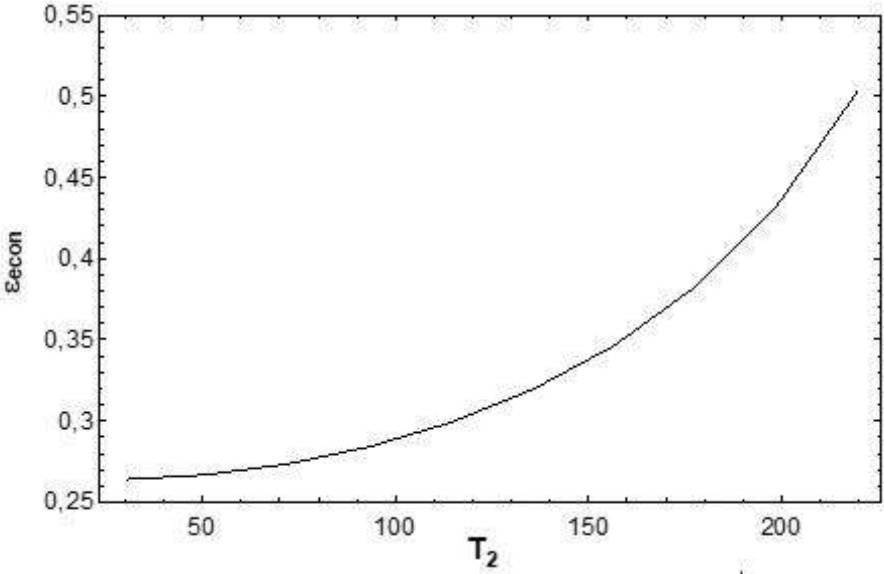
(2.16)

$\vec{v}$ ve z , hızı ve yüksekliği ifade ederken ($\vec{v}_0 = 0, z_0 = 0$); 2.15 ve 2.16 denklemleri hem sistemler hem de madde akışları için geçerlidir. Şaft işi, elektrik akışı, kinetik enerji ve potansiyel enerji tüm sistemin enerjisine dâhildir (Çengel, 2011):

2. Araştırma Bulguları ve Tartışma

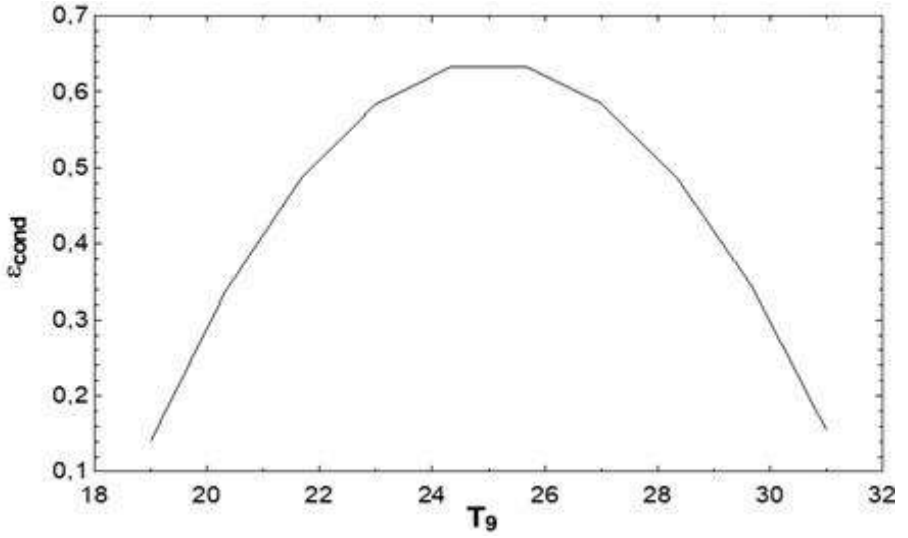
Bu çalışmada ORÇ'de R227ea gazı kullanılarak analiz yapılmıştır. Sistem şartları kabulleri ise prosesin kararlı şartlarda olduğu, buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki basınç kayıpları ile boru hatlarındaki kayıpların ihmal edildiğidir. Tüm analizde ki bileşenler adyabatik olduğu ve yüzey ile çevre arasında herhangi bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca hem potansiyel hem de kinetik enerji değişimleri yok sayılmıştır.

Şekil 2.1. Ekonomizerin sıcaklık-verim grafiği verilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak verim artışı sağlanmıştır. 25 °C ortam şartlarından 100 °C'ye kadar düzlemsel bir eğim ile verim değişim sağlarken 100-150 °C arasında parabolik olarak değişmeye başlamıştır. Özellikle sıcaklık 150 °C'yi geçtikten sonra parabolik bir artış sağlayarak verim % 53'lere varmıştır.



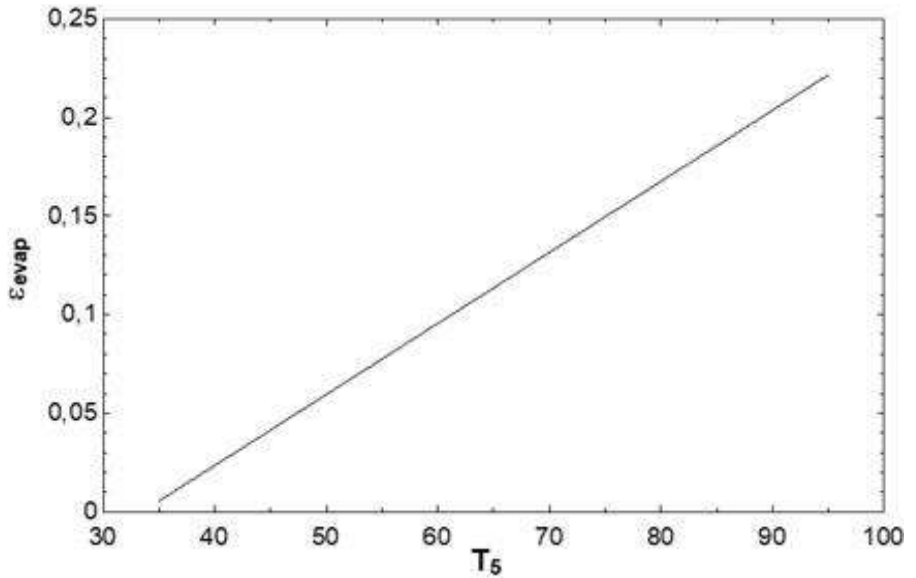
Şekil 2.1. Ekonomizerin sıcaklık-verim grafiği

Şekil 2.2. Yoğunlaştırıcının sıcaklık-verim grafiğinde görüldüğü üzere 25 °C civarında optimum ve maksimum verim sağlanmakta olup, verim % 60'lara varmıştır. 10 °C'den başlayarak artan verim 25 °C civarında maksimum seviyeye vardıktan sonra 31 °C civarında minimum düzeye inmiştir. Grafikten anlaşılabacağı üzere yoğunlaştırıcı ideal olarak 25 °C civarında en yüksek verime ulaşmıştır.



Şekil 2.2. Yoğunlaştırıcının sıcaklık-verim grafiği

Şekil 3.3. Buharlaştırıcının sıcaklık-verim grafiğinde görüldüğü üzere 35 °C'den 95'ye kadar lineer bir artış sağlayarak verimin yaklaşık verim sağlanmakta olup, verim % 22'lere varmıştır. Maksimum verim ise yaklaşık olarak % 22'lerde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.3. Buharlaştırıcının sıcaklık-verim grafiği

3. Sonuç

Bu çalışmada, Mardin Artuklu Üniversitesi'nde kurulacak seranın ısıtma merkezinden ekonomizer vasıtasıyla aktarılacak ısının organik rankine çevriminde hem seranın ısıtılması hem de elektrikli üretimi için kullanılması planlanmaktadır.

Dizayn edilen sistemin termodinamik analizi EES programında yapılarak I. Kanun verim grafikleri çizilmiştir. Bu çalışmada özellikle Ekonomizer, Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı üzerinden ısı transferi üzerinde durulmuştur. Akışkan olarak R227ea gazı kullanılmıştır.

Ekonomizerin sıcaklık-verim grafiğinde sıcaklık 150 °C'yi geçtikten sonra parabolik bir artış sağlayarak verim % 53'lere varmıştır. Yoğunlaştırıcının sıcaklık-verim grafiğinde yoğunlaştırıcı ideal olarak 25 °C civarında en yüksek verime ulaşmış ve maksimum verim % 60'lara varmıştır. Buharlaştırıcının sıcaklık-verim grafiğinde ise 95 °C'ye kadar lineer bir artış ile maksimum verim ise yaklaşık olarak % 22'lerde olduğu hesaplanmıştır.

KAYNAKÇA

- Abuşoğlu, A. 2008. Dizel Motorlu Kojenerasyon Sistemlerinin Ekserjetik ve Termoekonomik
- Abuşoğlu, A., Demir, S. ve Özahi, E., 2016. Energy And Economic Analyses Of Models
- Andreasen J.G., Larsen U., Knudsen T. ve Haglind F., Design and optimization of a novel organic Rankine cycle with improved boiling process, Energy, 91, 48-59, 2015.
- Bejan,A., Tsatsaronis,G., Moran,M., 1996. Thermal Design and Optimisation, John Wiley&Sons, New York, 542 p
- Cihan E., “Organik Rankine Çevrimi İle Çalışan Atık Isı Kaynaklı Bir Soğutma Sisteminin Performansının Araştırılması”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 34, 1, 101-109, 2014.
- Çengel, YA., 2011. Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla, 5. Baskı, Çeviri Editörü:
- Developed For Sustainable Hydrogen Production From Biogas-Based Electricity And Sewage
- Drescher U. ve Brüggemann D., Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants, Applied Thermal Engineering, 27, 223–228,2007.
- efficiency of an ORC using low-grade energy sources, Energy, 35, 1403-1411, 2010.
- Enstitüsü Gaziantep Üniversitesi
- Ergün, A., Özkaymak, M. ve Kılıçaslan, E., 2016, Organik rankine çevrimi prensibi ile düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretim uygulamaları, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 686-696.
- He C., Liu C., Zhou M., Xie H., Xu X., Wu S. ve Li Y., A new selection principle of working fluids for subcritical organic Rankine cycle coupling with different heat sources, Energy, 68, 283-291, 2014.
- Hung T. C., Wang S. K., Kuo C. H., Pei B. S. ve Tsai K. F., A study of organic working fluids on system
- Javanshir, A., & Sarunac, N. (2017). Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, Energy, 118, 85–96.

- Kaşka, Ö. (2014). Energy and exergy analysis of an Organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. *Energy Conversion and Management*, 77, 108–117.
- Kim M.S., Ahn Y., Kim B. ve Lee J.I., Study on the supercritical CO2 power cycles for land fill gas firing gas turbine bottoming cycle, *Energy*, 111, 893-909, 2016.
- Long R., Bao Y. J., Huang X. M., Liu W., “Exergy Analysis And Working Fluid Selection Of Organic Rankine Cycle For Low Grade Waste Heat Recovery”, *Energy*, 73, 475-483, 2014.
- Masheiti S., Agnew B., Walker S., “An Evaluation of R134a and R245fa as the Working Fluid in an Organic Rankine Cycle Energized From a Low Temperature Geothermal Energy Source”, *Journal Of Energy And Power Engineering*, 5, 392-402, 2011.
- New York: John Wiley & Sons. 724s.
- Performans Analizi Ve Optimizasyonu. Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü Fen Bilimleri
- Pınarbaşı, A., Güven Bilimsel, İzmir, 764: 753-757.
- Sadık Ata, Mehmet Aksoy, Remzi Şahin, Ali Kahraman. Jeotermal ısı kaynaklı Organik Rankine Çevriminde kuru ve izantropik akışkanların çevresel etkilerinin ve termodinamik performanslarının Karşılaştırılması, *GUJS* (2022) 12(3): 726-743 https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle
- Scott, K. ve Murano, C. 2007. A Study of A Microbial Fuel Cell Battery Using Manure Sludge
- Sludge. *Hydrogen Energy*, 41: 13426-13435.
- Traverso A., Massardo A.F. ve Scarpellini R., Externally fired micro-gas turbine: modeling and experimental performance, *Applied Thermal Engineering*, 26, 1935–1941, 2006.
- Waste. *J Journal of Chemical Technology And Biotechnology*. 82, 809817.
- Wylen G. V. ve Sonntag R. 1985. *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. 3rd edition.

BÖLÜM 8

MARDİN İLİNDE BİYOGAZ ÜRETİM POTANSİYELİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ*

Prof. Dr. Cengiz KARACA

GİRİŞ

Enerji, modern toplumların kalkınmasında ve ekonomik refah düzeyinin artırılmasında temel bir rol oynamaktadır. Sanayileşme, nüfus artışı ve kentleşme gibi faktörler, enerji talebini her geçen gün artırmakta; bu durum mevcut enerji kaynakları üzerinde baskı oluşturmakta ve alternatif enerji arayışlarını zorunlu hale getirmektedir. Özellikle fosil yakıtların sınırlı olması, fiyat dalgalanmaları ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı stratejik bir öneme sahiptir. (Karaca, 2015). Fosil yakıtların sürekli kullanımı sonucunda oluşan sera gazlarının (GHG) çevre üzerindeki olumsuz etkisi, biyolojik kaynaklardan alternatif yakıtların üretimine yönelik araştırmaların başlamasını sağlamıştır (Achinas et al., 2017).

Bu bağlamda biyogaz, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji üretimi açısından dikkat çeken yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Biyogaz, biyolojik olarak parçalanabilir maddelerin anaerobik ortamda parçalanması sonucu oluşan bir gazdır. Biyogaz üretimi, organik atıkların çeşitli bakteriler tarafından işlendiği karmaşık bir işlemdir.

*Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.

Organik maddelerden biyogaz oluşumu, anaerobik bakterilerin etkisiyle üç aşamada gerçekleşir: hidroliz, asetogenez ve metanogenez. (Baltrenas ve ark., 2005). Biyogaz, yaklaşık %60-70 metan (CH₄), %30-40 karbondioksit (CO₂) ve eser miktarda diğer gazlar içerir. Biyogaz, çöp malzemesi, hayvan gübresi, atık su ve endüstriyel, geleneksel ve ticari organik atıklar gibi çeşitli atıklardan üretilir. Anaerobik çürütme, ısı ve yakıt gibi enerji üretiminde biyogaz kullanarak ekonomik, çevresel ve iklimsel avantajlar sağlar. Gübrelerin doğal bozulması, depolama sırasında metan ve karbondioksit emisyonlarının atmosfere yayılmasına neden olur. Metanın sera etkisinin karbondioksitten daha yoğun olduğu dikkate alınmalıdır (Baltrenas & Kvasauskas, 2008). Gübrelerin anaerobik bozulması, depolama sırasında doğal ayrışmadan kaynaklanan metan emisyonunu önler ve atmosfere salınan sera gazı emisyonlarını azaltır. Gübre kullanılarak üretilen biyogazın enerji üretiminde kullanılması sonucunda fosil yakıtlar ikame edilir; böylece sera gazı ve diğer kirletici emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur (Scarlat, 2018).

Türkiye'nin enerji ithalat bağımlılığı düşünüldüğünde, yerel ölçekte geliştirilecek biyogaz üretim sistemleri, ulusal enerji arz güvenliği açısından da önem arz etmektedir. Bu kapsamda, Mardin ili sahip olduğu hayvansal üretim kapasitesi ve yaygın kırsal yerleşim yapısıyla biyogaz üretimi için uygun potansiyele sahip iller arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuğu gübrelerinden elde edilebilecek biyogaz üretim potansiyeli belirlenmiş ve bu potansiyelin ilçelere göre dağılımı incelenmiştir. Bu amaçla,

hayvan gübresinin biyogaz ve bunun enerji potansiyeli bir coğrafi bilgi sistemi programı kullanılarak haritalanmıştır. Haritalama işlemi, ilçeler arasındaki veri farklılığı ve kaynaklar arasındaki mesafenin daha net gösterilmesi için yapılmıştır. Ayrıca biyogaz üretimi sayesinde sağlanabilecek enerji miktarı ile birlikte sera gazı emisyon azaltımı da hesaplanarak çevresel etkileri ortaya konmuştur. Böylece, Mardin özelinde sürdürülebilir biyogaz yatırımlarına bilimsel bir altyapı sunulması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Mardin ili, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup geniş tarım arazilerine ve farklı agro-ekolojik bölgelere sahip bir tarım kentidir. İl, merkez ilçe dâhil olmak üzere toplam 10 ilçeden oluşmaktadır. (Şekil 1).



Şekil 1. Mardin ili ve ilçeleri (Wikipedia; 2025)

Hayvan gübresi ve biyogaz üretimi hesaplama yöntemi

Bu çalışma kapsamında yapılacak hesaplamaları için Türkiye İstatistik Kurumu'nun 2024 yılı hayvan varlığı istatistik verileri

kullanılmıştır (TÜİK, 2025). Biyogaz üretim potansiyelinin hesaplanmasında sadece sığır ve yumurta tavuğu popülasyonu verileri kullanılmıştır. Çünkü barınakta kalma süresine göre belirlenen hayvan gübresinin ulaşılabilirliği değeri sığır çiftliğinde (%65) ve yumurta tavuğu çiftliğinde (%99) en yüksek değerlere ulaşmaktadır (Başçetinçelik et al., 2005). Hayvan gübresi ve biyogaz üretim miktarını hesaplamak için aşağıdaki yöntemler kullanılmıştır (Başçetinçelik et al., 2006; Karaca,2017; Karaca, 2018).

$$AFM = NA \times MPPA/1000 \quad (1)$$

AFM: Günlük taze gübre miktarı (t)

NA: Hayvan sayısı

MPPA: Hayvan başına günlük gübre üretim miktarı (kg)

(MPPA değerleri sığır için 27.24 ve yumurta tavuğu için 0.08)

$$ASM = AFM \times SMR \quad (2)$$

ASM: Günlük katı gübre miktarı (t)

SMR: Katı gübre oranı (%)

$$TSUM = ASM \times AOM \times AGP \quad (3)$$

TUSM: Yıllık toplam kullanılabilir katı gübre (t)

AOM: Gübrenin ulaşılabilirliği (%)

AGP: Yıllık yetiştirme periyodu (gün) (sığır ve yumurta tavuğu için 365 gündür.)

$$AB = TSUM \times BCR_{SM} \quad (4)$$

AB: yıllık biyogaz üretim miktarı (m³)

BCR_{SM}: katı gübrenin biyogaz dönüşüm oranı (200 m³ t⁻¹)

$$THV = AB \times HV \quad (5)$$

THV: toplam ısı değeri (MJ)

HV: birim biyogazın ısı değeri (22.7 MJ m⁻³)

Bir gaz motoruyla biyogazdan elektrik üretimi aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$EP = (THV \times EPE_{Net}) / 3.6 \quad (6)$$

EP: yıllık elektrik üretimi (MWh_{el})

EPE_{Net}: bir biyogaz motorunun net elektrik üretim verimliliği (40%) (Clarke Energy, 2021)

Biyogaz sisteminin GHG emisyon azaltımı hesaplama yöntemleri

Biyogaz üretiminin sera gazı emisyon azaltıcı etkisi, ERMM (gübre yönetimi ile emisyon azaltımı) ve ERES (enerji ikamesi ile emisyon azaltımı) olmak üzere iki faktöre dayanmaktadır.

ERMM (gübre yönetimi ile emisyon azaltma)

Anaerobik koşullar altında (oksijen yokluğunda) hayvan gübresinin ayrışması, depolama boyunca metan (CH₄) üretir. Bir biyogaz üretim sisteminin en önemli faydası, kontrolsüz metan emisyonlarını önlemektir. Üstü açık lagün gübre depolama sistemlerinden CH₄ üretimini hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılmıştır (IPCC, 2006; Guo Guo, 2010). Bu hesaplamalar yıllık ortalama sıcaklığa göre yapılmıştır.

$$CH_{4Manure} = EF_{(T)} \times N_{(T)} \quad (7)$$

CH_{4Manure} = Gübre yönetiminden kaynaklanan metan emisyonları (kg CH₄ yıl⁻¹)

EF_(T) = Hayvan kategorisi için emisyon faktörü, (kg CH₄ hayvan⁻¹yıl⁻¹)

N_(T) = Hayvan türlerinin/Kategorilerinin hayvan sayısı

T = Tür/Kategori

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} \times 365) \times (B_{O(T)} \times 0.67) \times \left(\frac{MCF_{S,k}}{100} \right) \quad (8)$$

$VS_{(T)}$ = Hayvan kategorileri için günlük uçucu katı miktarı (kg kuru madde. hayvan⁻¹ gün⁻¹)

$B_{O(T)}$ = En yüksek metan üretim kapasitesi (m³ kg⁻¹)

0.67 = CH₄ için m³ - kg dönüşüm çarpanı

$MCF_{S,k}$ = Gübre yönetim sistemi için metan dönüşüm parametreleri, iklim bölgesine göre (k), (%)

$$ERMM_{CO_2} = CH_{4Manure} \times 27.2 \quad (9)$$

$ERMM_{CO_2}$ = Gübre yönetiminden kaynaklanan CO₂ emisyon azaltımı (kg CO₂ yıl⁻¹)

27.2 = CH₄ 'nın eşdeğer CO₂ 'e dönüştürme katsayısı (ERC Evolution, 2023)

ERES (enerji ikamesi ile emisyon azaltımı)

Kırsal bölgelerde biyogaz yüksek ısı değeri (22.7 MJ m⁻³) nedeniyle katı fosil yakıtlar ve diğer biyokütle kaynakları yerine kullanılabilir. Bu nedenle, biyogaz üretim sisteminin CO₂ emisyon azaltımına etkisi, fosil yakıt ikame miktarına bağlıdır. ERES, biyogaz ikameli yakıt tüketimi tarafından üretilen GHG emisyonları olarak hesaplanır. Bu kısımda, hesaplanan biyogaz potansiyeli yerine ikame edilen her bir fosil yakıt için ayrı ayrı CO₂ emisyon azaltımı hesaplanmıştır. Bunun için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Guo Guo, 2010)

$$ERES_{CO_2 fuel} = FS \times CE_{fuel} \times EF_{CO_2 fuel} \quad (10)$$

$ERES_{CO_2 fuel}$ = İkame yakıt için CO₂ emisyon azaltımı, (kg yıl⁻¹)

FS = Biyogaz enerji eşdeğerinin yakıt ikame değeri, (GJ yıl⁻¹)

CE_{fuel} = Yakıtların yanma verimliliği

$EF_{CO_2 fuel}$ = CO₂ emisyon faktörleri (kg GJ⁻¹)

$$FS=THV \times 0.6 \quad (11)$$

THV = Biyogaz potansiyelinin toplam ısı değeri (GJ yıl⁻¹)

0.6 = Biyogazın yanma verimliliği

BULGULAR VE TARTIŞMA

Hayvan gübresi, biyogaz üretimi ve enerji değeri potansiyelleri

Mardin ilinin 2024 yılında sığır ve yumurta tavuğu sayısına bağlı olarak toplam hayvan gübresi potansiyeli sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Hayvan sayısı ve toplam hayvan gübresi miktarı.

Hayvan	NA	AFM (t)	SMR (%)	ASM (t)	AOM (%)	TUSM (t yıl ⁻¹)
Sığır	66,760	663,768	12.7	84,299	65	54,794
Yumurta tavuğu	2,195,214	64,100	25.0	16,025	99	15,865
Toplam	727,868			100,324		70,659

Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuklarından elde edilen toplam kullanılabilir katı gübre miktarı 2024 yılında 100.32 bin ton olarak hesaplanmıştır. Gübre kaynaklarının dağılımına bakıldığında %77.5 ile en büyük paya sığırı gübresi sahiptir. Bunu sırasıyla %22.5'lik payla ile yumurta tavuğu gübresi takip etmektedir.

Tablo 2. Biyogaz ve enerji potansiyeli.

Hayvan	TUSM (t)	AB (m ³)	THV (GJ)	EP (MW _{hel})
Süt sığırı	54,794	10,958,809	248,765	27,641
Yumurta tavuğu	15,865	3,172,962	72,026	8,003
Toplam	70,659	14,131,772	320,791	35,643

Mardin ilinin hayvan gübresi kaynaklı biyogaz üretim potansiyeli yıllık toplam 14.13 Mm³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca üretilen bu

biyogazın ısı değeri ise toplam 320.8 TJ olduğu hesaplanmıştır. Hayvan gübresinden elde edilen biyogaz potansiyelinin tamamının bir gaz motoru vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle de yıllık 35,643 MWh_{el} elektrik enerjisi elde edilebileceği belirlenmiştir (Tablo 2). Bu değer Mardin ilinin 2023 yılı toplam elektrik enerjisi tüketiminin (2,465,000 MWh) %1.45'ini karşılayabilmektedir.

Karaca (2022, 2023a, 2023b, 2024) tarafından Sivas, Konya, Gaziantep ve Kayseri illeri için yapılan çalışmalar sonucunda, hayvan gübresinden elde edilen toplam biyogazın sırasıyla 42,04, 105.67, 41.29, ve 76.4 Mm³ olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalarda iller ile kıyaslandığında Mardin ilinin hayvan gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin düşük olduğu görülmektedir.

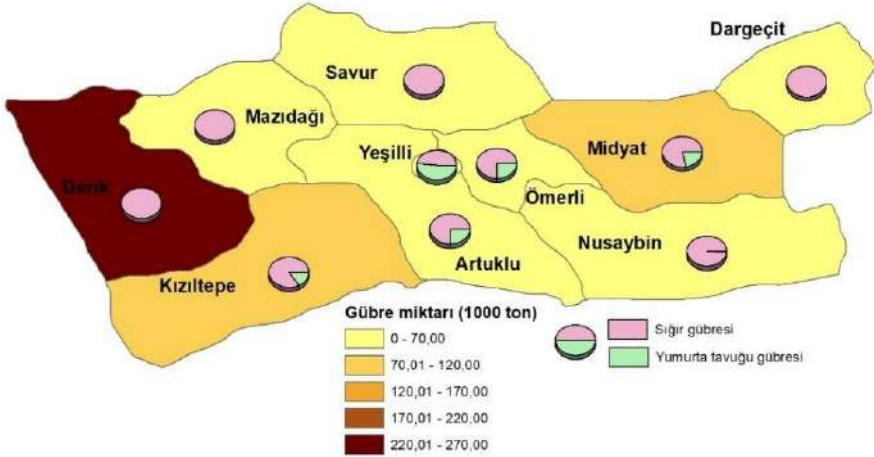
Tablo 3. Mardin ili ilçelerine göre gübre, biyogaz, ısı ve elektrik üretim potansiyelleri.

İlçeler	Gübre (t)	Biyogaz (m ³)	Isı değeri (GJ)	Elektrik üretimi (MWh)	Toplam içindeki pay (%)
Artuklu	68,679	1,713,335	38,893	4,321	12.1
Dargeçit	50,151	830,646	18,856	2,095	5.9
Derik	262,586	4,346,862	98,674	10,964	30.8
Kızıltepe	75,941	1,636,218	37,142	4,127	11.6
Mazıdağı	43,444	720,387	16,353	1,817	5.1
Midyat	88,636	2,088,507	47,409	5,268	14.8
Nusaybin	60,525	1,023,347	23,230	2,581	7.2
Ömerli	20,432	504,951	11,462	1,274	3.6
Savur	38,976	649,753	14,749	1,639	4.6
Yeşilli	18,497	617,765	14,023	1,558	4.4
Toplam	727,868	14,131,772	320,791	35,643	100

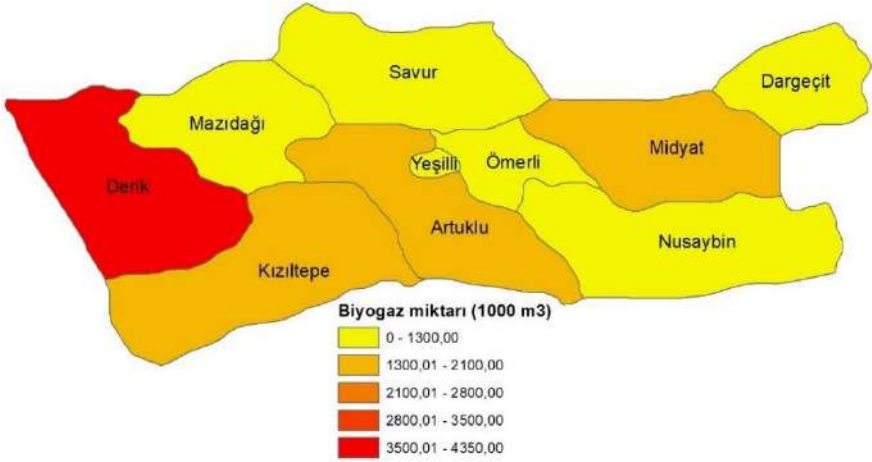
Tablo 3 incelendiğinde Derik ilçesinin 4.35 Mm³ biyogaz üretim potansiyeli ile en büyük potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bu

ilçeyi Midyat (2.09 Mm³), Artuklu (1.71 Mm³) ve Kızıltepe (1.64 Mm³) ilçeleri sırasıyla takip etmektedir.

Gübre ve biyogaz miktarı her ilçe için ayrı ayrı hesaplanarak ve haritalanmıştır. Mardin ilinin 10 ilçesi için hayvan gübresi ve biyogaz üretim potansiyelinin dağılımını gösteren haritalar Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Yeşilli hariç diğer tüm ilçelerde sığır gübresinin en fazla potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca Artuklu, Ömerli ve Midyat ilçelerinde yumurta tavuğu gübresinin de önemli sayılabilecek bir potansiyelinin olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Mardin ilinde hayvan gübresi potansiyelinin dağılımı



Şekil 4. Mardin ilinde biyogaz üretim potansiyelinin dağılımı

Bu haritalar, biyogaz potansiyelinin ilin merkezi ve batısında yer alan (Artuklu Derik ve Kızıltepe) ilçelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum biyogaz üretim tesislerinin bu ilçelerin kapladığı alanda uygun olan bir yere kurulabileceğini göstermektedir. Çünkü, bu ilçelerde kurulacak biyogaz üretim tesislerine hammadde temini açısından avantaj sağlamaktadır.

Şu anda ilde kurulu herhangi bir hayvan gübresinden biyogaz üreten tesis bulunmamaktadır. Bu hesaplamalara göre, Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuğu gübrelerinden elde edilen biyogazdan elektrik üretim amacıyla kurulacak olan tesislerin toplam kurulu güç potansiyeli 5.1 MW'tır. Tesislerin kurulu güçleri Derik'te 1.6 MW ve Kızıltepe ve Artuklu arasında 1.21 MW olacak şekilde planlanabilir. Diğer önemli bir potansiyele sahip olan ilçe Midyat'ta da 0.75 MW kurulu güçlü bir biyogaz çevrim santrali kurulabilir.

Biyogaz sisteminin GHG emisyon azaltımı

Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuğu gübrelerinin oluşturduğu çevresel etkinin belirlenmesi amacıyla yapılan analizden ilki olan gübre yönetimi ile emisyon azaltımı (ERMM) hesaplama sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Mardin ilinde gübre yönetim sisteminin CH₄ emisyonu azaltımı

T	N	VS (kg·(hayv.·gün) ⁻¹)	B ₀ (m ³ CH ₄ kg ⁻¹)	MCF (%)	EF (kgCH ₄ ·yıl ⁻¹)	CH ₄ (kg·yıl ⁻¹)	CO ₂ -eq. (kg·yıl ⁻¹)
Sığır	66,760	2.8	0.13	76	67.6523	4,516,468	122,847,939
Yumurta tavuğu	2,195,214	0.02	0.39	1.5	0.0286	62,810	1,708,438
Toplam						4,579,279	124,556,377

Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuğu gübre kaynağının çevreye yayacağı CH₄ miktarı yaklaşık olarak 4,579.3 ton olarak hesaplanmıştır. Bu değerin CO₂ eşdeğeri ise yaklaşık 124,556.4 tondur. Sığır gübresinin %98.6 oranında toplam emisyon miktarının neredeyse tamamının kaynağı olduğu belirlenmiştir.

Mardin ilinde hayvansal gübre kaynaklı elde edilen biyogazın çevresel etkisinin belirlendiği diğer analiz olan yakıt ikamesi ile sağlanacak CO₂ emisyon azaltımı (ERES_{CO₂ fuel}) hesaplama sonuçları ise Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Mardin ilinde enerji ikamesinden kaynaklanan CO₂ emisyon azaltımı

İkame Yakıt	FS (GJ·yıl ⁻¹)	EF _{CO₂ fuel} (kg·GJ ⁻¹)	CE _{fuel}	CO ₂ emisyonu (kg·yıl ⁻¹)
Odun	192,475	112	0.24	89,821,540
Kömür	192,475	94.6	0.4	45,520,273
Biyogaz	192,475	0	0.6	0
Doğal gaz	192,475	56.1	0.57	18,943,565

Üretilen biyogazın odunun yerine yakıt olarak kullanılması sonucu en fazla emisyon azaltımı (89,821.54 ton) oluşacağı belirlenmiştir.

Tablo 6. Mardin ilinde hayvan gübresi biyogaz sisteminin toplam CO₂ emisyon azaltımı

ERMM CO ₂ -eqv. (kg·yıl ⁻¹)	İkame yakıtlar	ERESCO ₂ fuel (kg·yıl ⁻¹)	Toplam CO ₂ emisyon azaltımı (kg·yıl ⁻¹)
124,556,377	Odun	89,821,540	214,377,918
	Kömür	45,520,273	170,076,651
	Doğal gaz	18,943,565	143,499,943

Hayvan gübresi yönetim sisteminden kaynaklanan emisyon azaltımı ve hayvan gübresinden üretilen biyogazın diğer yakıtların ikame edilmesinde kullanılmasıyla oluşan emisyon azaltımları toplandığında, Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuğu gübresinden elde edilen biyogaz potansiyelinin tamamının değerlendirilmesi sonucunda 214,378 tona kadar CO₂ emisyonu azaltımı sağlanabileceği belirlenmiştir (Tablo 6).

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma ile Mardin ilinde hayvansal atıklardan biyogaz üretimi açısından mevcut potansiyel ortaya konmuştur. Özellikle sığır ve yumurta tavuğu yetiştiriciliği yapılan hayvansal üretim birimlerinden elde edilen gübrelerin, doğru şekilde yönetilerek enerjiye dönüştürülmesi durumunda hem ekonomik hem de çevresel anlamda elde edilecek kazanımlar belirlenmiştir. Çalışma sonucunda hayvansal

gübrelerden elde edilen biyogaz potansiyeli 2024 yill  hayvan sayısına bağlı olarak 14.13 Mm³ olduğu tespit edilmiştir.

Derik ilçesi en büyük biyogaz potansiyeline sahip olan ilçe olarak belirlenmiştir. Bunu Midtyat ve Artuklu ilçeleri takip etmektedir. Hayvan gübresinden elde edilen biyogaz potansiyelinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile yaklaşık 35,643 MWh_{el} elektrik enerjisi elde edilebilir. Mardin ilinde hayvan gübresinden elde edilecek olan biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesi için henüz bir yatırımın yapılmadığı belirlenmiştir.

Biyogaz üretiminin yaygınlaştırılması, yalnızca enerji  retimiy le sınırlı kalmayıp sera gaz  emisyonlarının azaltılmasına, koku ve  evre kirliliğinin  nlenmesine ve tarımsal atıkların değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Mardin ilinde sığır ve yumurta tavuğu gübresinden elde edilen biyogaz potansiyelinin tamamının değerlendirilmesi sonucunda 214,378 tona kadar CO₂ emisyonu azaltımı sağlanabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen biyogazın elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmesi ile yerel enerji arz  güçlendirilecek, enerji dışa bağımlılığı azaltılacaktır.

Mardin gibi tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olarak sürdürüldüğü illerde, biyogaz teknolojilerinin yaygınlaştırılması, hem kırsal kalkınma hedeflerine hizmet edecek hem de Türkiye'nin yeşil enerji dönüşümüne katkıda bulunacaktır. Bu nedenle, biyogaz üretim potansiyelinin değerlendirilmesi, sadece yerel yönetimler ve özel sektör için değil, aynı zamanda ulusal enerji ve  evre politikaları açısından da önemli bir fırsat alan  sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Achinas, S., Achinas, V., Euverink, G.J.W. (2017). A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*, 3(3), 299–307.
- Baltrenas, P., Jankaite, A., Raistenskis, E. (2005). Experimental investigation of biodegradation processes in food waste. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 13(4), 167–176.
- Baltrenas, P., Kvasauskas, M. (2008). Experimental investigation of biogas production using fatty waste. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 16(4), 178–187.
- Başçetinçelik, A., Karaca, C., Öztürk, H.H., Kaçira, M., Ekinci, K. 2005. Agricultural biomass potential in Turkey. *Proceedings of the 9th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture & 27th International Conference of CIGR Section IV: The Efficient Use of Electricity and Renewable Energy Sources in Agriculture*,. pp.195-199, İzmir, Türkiye.
- Başçetinçelik, A., Öztürk, H.H., Karaca, C., Kaçira, M., Ekinci, K. Kaya, D., Baban, A., Komitti N., Barnes, I., Nieminen, M. (2006). Final Report of Exploitation of Agricultural Residues in Turkey. *AGRO-WASTE -Exploitation of Agricultural Residues in Turkey. EU Life Program Project*, Project No: LIFE03 TCY/TR/000061.
- Clarke Energy. (2021, December 15). *CHP efficiency for biogas*. <https://www.clarke-energy.com/2013/chp-cogen-efficiency-biogas/>
- ERC Evolution. (2023, August 29). IPCC sixth assessment report global warming potentials. *ERCE News*. <https://erce.energy/erceipccsixthassessment/>
- Guo Guo L. (2010). Potential of biogas production from livestock manure in China: GHG emission abatement from ‘manure-biogas-digestate’ system. *Master’s Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Energy Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden*.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, V4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management.
- Karaca, C. (2015). Mapping of energy potential through annual crop residues in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2),104-109.
- Karaca, C. (2017). Hatay İlinin Hayvansal Gübre Kaynağından Üretilabilir Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 22(1), 34-39.
- Karaca, C. (2018). Determination of Biogas Production Potential from Animal Manure and GHG Emission Abatement in Turkey. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 205-210.
- Karaca, C. (2022). Biogas Production Potential from Animal Manure and Environmental Effect in Sivas Province. *ISPEC 10th International Conference on Agriculture, Animal Sciences and Rural Development Conference Proceedings Book*, pp. 389-401, Sivas, Türkiye.
- Karaca, C. (2023a). The biogas potential of animal manure and its GHG reduction effect in Konya Province, Turkey. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(4), 232–239.
- Karaca, C. (2023b). Energy Potential and Environmental Effects of Biogas Production from Animal Manure in Gaziantep Province. *11. International Summit Scientific Research Congress Full Texts Book*, pp. 385-392, Gaziantep, Türkiye, pp. 385-392.
- Karaca, C. 2024. The Potential of Biogas Production from Livestock Manure and Effects on Greenhouse Gas Reduction in Kayseri Province. *4. International World Energy Conference Full Text Book*, pp.1108-1117, Kayseri, Türkiye.
- Scarlat, N., Dallemand, J.F., Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457-472.

TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2025, Temmuz 17). *Hayvansal Üretim İstatistikleri: Mardin ili tüm ilçeler*.
<https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>.

Wikipedia (2025, Temmuz 22). *Mardin'in ilçeleri*.
https://tr.wikipedia.org/wiki/Mardin%27in_il%C3%A7eleri

BÖLÜM 9

TARIMSAL ATIKLARDAN BİYOKÜTLE PELET ÜRETİMİNDE GÜNCEL DURUM VE TEKNOLOJİK EĞİLİMLER

Arş. Gör. Osman Mert YAZ

Doç. Dr. Bahadır DEMİREL

Fatih KESKİNKILIÇ

Prof. Dr. Gürkan Alp Kağan GÜRDİL

GİRİŞ

Günümüzde iklim değişikliği ve çevresel sorunlar, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi zorunlu kılmaktadır. Yenilenebilir enerjiler içinde biyokütle, özellikle sürdürülebilirliği ve yaygın bulunabilirliği sayesinde önemli bir paya sahiptir. Nitekim küresel birincil enerji arzının yalnızca %14'ünün yenilenebilir kaynaklardan sağlandığı, bunun da %67'sinin biyokütle temelli olduğu bildirilmektedir (Sarker vd., 2023). Biyokütle enerjisi; orman ürünleri, tarımsal atıklar ve diğer organik atıklardan elde edilerek karbon döngüsüne net katkı yapmadan enerji üretebilmesiyle öne çıkar. Özellikle tarımsal üretimden ve gıda endüstrisinden arta kalan atıklar (sap, saman, kabuk, çekirdek, prina vb.), büyük miktarlara ulaşmasına rağmen çoğu zaman açıkta yakılarak bertaraf edilmekte veya çürümeye bırakılmaktadır. Bu durum hem çevre kirliliğine hem de potansiyel bir enerji kaynağının israfına yol açmaktadır.

***Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.**

Tarımsal atıkların enerjiye dönüştürülmesi, kırsal bölgelerde atık yönetimine çözüm sağlarken yerel ekonomiye katkı ve fosil yakıt kullanımının azalması gibi faydalar sunar (Azargohar vd., 2018).

Tarımsal biyokütleden enerji üretmenin birçok yolu bulunmakla birlikte, katı biyoyakıt peletleri son yıllarda giderek artan bir ilgi görmektedir. Pelet yakıtlar, hammaddenin kurutulup öğütüldükten sonra yüksek basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen silindirik küçük yakıt parçalarıdır. Peletleme işleminde, odunsu biyoküttele doğal olarak bulunan lignin gibi bileşenler bağlayıcı görevi görerek parçaların birbirine kenetlenmesini sağlar. Sonuçta elde edilen biyokütle peletleri, yüksek yoğunlukları ve düşük nem içerikleri sayesinde ham biyokütleye göre daha yüksek enerji yoğunluğuna ve iyi yanma özelliklerine sahip olmaktadır (Bajwa vd., 2018). Bu özellikler, pelet yakıtların depolama ve nakliye maliyetlerini düşürmekte ve yanma verimini artırmaktadır. Nitekim gevşek sap-saman gibi atıklar 80–150 kg/m³ yığın yoğunluğuna sahipken pelet haline getirildiğinde yoğunluk 600–1200 kg/m³ mertebesine çıkabilmektedir (Li vd., 2022). Böylece, aynı hacimde çok daha fazla enerji depolanabilmekte ve taşınabilmektedir. Ayrıca pelet yakıtlar akışkan özellik gösterdiğinden silo, tanker gibi ekipmanla kolaylıkla taşınabilir ve otomatik beslemeli kazanlarda veya sobalarda kullanılabilir. Bu avantajlar sayesinde pelet üretimi, hem endüstriyel ölçekli enerji santrallerinde kömüre alternatif yakıt olarak hem de bireysel ısınma amaçlı kullanımda giderek yaygınlaşmaktadır (Mortadha vd., 2025).

Küresel ölçekte pelet üretimi ve tüketimi hızla artmaktadır. 2000 yılında 2 milyon ton civarında olan dünya pelet üretimi 2015 yılına

gelindiğinde 37 milyon tona ulaşmıştır. 2013 yılında Avrupa Birliği ülkeleri yaklaşık 12,2 milyon tonla dünya pelet üretiminin yarısını gerçekleştirirken, Kuzey Amerika (ABD ve Kanada) %31, Asya (özellikle Çin) %9 ve Rusya %7 pay almıştır. Aynı yıl küresel pelet tüketimi 24–25 milyon ton civarında gerçekleşmiş ve bunun büyük kısmı Avrupa’da kullanılmıştır.

Pelete olan talep, başta Avrupa olmak üzere yenilenebilir enerji politikalarına bağlı olarak her yıl artış göstermektedir. Birçok kömür yakıtlı termik santral, pelet ve diğer biyokütle yakıtlarıyla ortak yakma uygulamalarına geçerek fosil yakıt tüketimini azaltmaktadır. Özellikle Birleşik Krallık’ta 2010’lu yıllardan itibaren bazı büyük santraller tamamen pelet yakıt kullanımına dönmüştür (Ibitoye vd., 2021). Tüm bu gelişmeler, tarımsal atıklar gibi kullanılmayan biyokütle potansiyelinin enerji üretimine kazandırılmasına yönelik ilgiyi artırmaktadır.

BİYOKÜTLE PELETLEME SÜRECİ VE YÖNTEMLERİ

Peletleme süreci, biyokütle hammaddesinin çeşitli ön işlemlerden geçirildikten sonra mekanik sıkıştırmaya tabi tutulmasını içerir. Genel olarak işlem basamakları; hammaddenin kurutulması, uygun boyuta kadar öğütülmesi, gerektiğinde bazı ön işlem ve katkı maddeleriyle karıştırılması, ve son olarak yüksek basınç altında kalıptan geçirilerek pelet formunun verilmesi şeklindedir (Sarker vd., 2023).

Şekil 1’de tipik bir peletleme sürecinin adımları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Peletleme sürecinin adımları (Sarker vd., 2023).

Peletleme işlemi sırasında sürtünmeyle belirli bir sıcaklığa ulaşan biomass parçacıkları, yüksek basıncın etkisiyle birbirine yaklaştırılır ve lignin gibi termoplastik bileşenlerin yumuşamasıyla kalıcı bağlar oluşur. Bu sayede silindirik formda yoğun bir yakıt üretilir. Son adımda peletler soğutularak sertleşmesi sağlanır ve paketlenme/depolamaya hazır hale gelir.

Peletleme işlemi için yaygın olarak kullanılan makineler yassı kalıp (düz kalıp) ve halka kalıp pelet presleridir. Yassı kalıp preslerde, dönen pres merdaneleri sabit düz bir kalıp üzerinde hammaddeyi deliklerden iterken; halka kalıp preslerde dönen bir halka şeklindeki kalıp içinde silindirler yardımıyla malzeme sıkıştırılır. Halka kalıp makineler genellikle endüstriyel yüksek kapasiteli üretimde kullanılırken, yassı kalıp presler daha düşük kapasiteli veya çiftlik tipi uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca piston pres (hidrolik veya mekanik) ve vidalı ekstruder tipli briketleme makineleri de mevcuttur; bunlar

pelet yerine daha büyük boyutlu briketler üretebilir. Briketleme ve peletleme prensip olarak benzerdir; temel fark ürün boyutu ve uygulama alanındadır. Briketler çapı 30-100 mm olabilen daha büyük silindirik yakıtlar olup genellikle elle besleme veya büyük yakma sistemlerinde kullanılırken, peletler 6-12 mm çapında olup otomatik beslemeye uygun yakıtlardır (Şekil 2) (Manickam vd., 2006). Densifikasyon (hacim yoğunlaştırma) yöntemleri uygulanan basınca göre düşük, orta ve yüksek basınçlı olarak da sınıflandırılabilir. Peletleme ve briketleme yüksek basınçlı yöntemlerdir; balyalama ise düşük basınçlı bir densifikasyon yöntemi olarak sayılabilir (Ibitoye vd., 2021). Sonuç olarak densifikasyon ürünleri (pelet ve briketler), yakıtın fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerini iyileştirerek daha verimli yanma ve geniş uygulama imkânı sağlar.



Şekil 2. Briket ve peletin genel görünümü (Ibitoye vd., 2021).

PELET KALİTESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Üretilen peletin yakıt kalitesini belirleyen başlıca özellikler enerji içeriği (ısı değeri), mekanik dayanım (tozlanma ve parçalanmaya karşı direnç), yoğunluk, nem ve kül içerikleridir (Sarker vd., 2023; Miranda

vd., 2015). Bu özellikler ise hem hammaddenin doğasına hem de işlem şartlarına bağlıdır. Hammadde özellikleri (örneğin odunsu ya da otsu oluşu, lignin, selüloz ve kül içeriği), parçacık boyutu, nem oranı, presleme sıcaklığı ve basıncı, kalıp geometrisi ve soğuma/kuruma süresi gibi faktörler pelet kalitesinde belirleyicidir (Kaliyan ve Morey, 2009; He vd., 2024).

Peletleme için ideal hammadde nemi genellikle %8-12 aralığında kabul edilir (Bajwa vd., 2018). Çok düşük nem ($<5\%$), parçacıklar arası bağ oluşumunu zorlaştırarak pelet dayanımını düşürürken; çok yüksek nem ($>15\%$) ise pelet presinde buhar basıncı oluşturarak çatlamalara ve enerji kaybına yol açar (Li vd., 2022). Optimal nem aralığında lignin yumuşaması ve parçacıkların biçimlenmesi en iyi düzeydedir. Örneğin, %7 nemli çam talaşından üretilen peletlerin dayanımı %92 iken, nem %12,5'e çıkarıldığında dayanımın %96'ya yükseldiği rapor edilmiştir (Sarker vd., 2023). Ancak nemin daha da artması dayanımı tekrar düşürmektedir.

Hammaddenin öğütölme derecesi, pelet yoğunluğunu ve dayanımını etkiler. Küçük boyutlu parçacıklar sıkıştırma sırasında daha yoğun paketlenerek gözenekliliği azaltır ve bağ oluşumunu kolaylaştırır. Genelde 2-5 mm boyutuna kadar öğütülen malzemeler peletleme için uygundur (Kaliyan ve Morey, 2009). Ancak aşırı ince öğütme (<1 mm) enerji tüketimini artırdığı gibi, presleme esnasında tıkanma veya geri basınç sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle ekonomik açıdan optimum bir öğütme seviyesi tercih edilir. Lifli ve iri malzemelerin (örneğin sap, dal parçaları) önceden uygun boyuta

getirilmesi hem makineye beslemeyi kolaylaştırır hem de pelet kalitesini artırır (Ibitoye vd., 2021).

Pelet presinde uygulanan spesifik basınç (genellikle 50–150 MPa aralığında) ile kalıp sıcaklığı kritik rol oynar. Yüksek basınç, parçacıkların daha fazla temas ve deformasyonunu sağlayarak kohezyonu artırır. Ancak belli bir noktadan sonra basıncın artışı, enerji tüketimini artırdığı halde pelet yoğunluğuna sınırlı katkı yapar (Kaliyan ve Morey, 2009). Basınç ile birlikte peletleme bölgesinde sürtünme nedeniyle sıcaklık yükselir. Kalıp/malzeme sıcaklığı yaklaşık 70–100°C düzeyine ulaştığında odunsu biyokütledeki lignin yumuşayarak viskoz bir bağlayıcı gibi davranmaya başlar (Stelte vd., 2012). Dolayısıyla sıcaklığın bu aralığa gelmesi dayanımı artırır. Ancak çok yüksek sıcaklıklar (>150°C) hem uçucu bileşen kaybına hem de yapının gevrekleşmesine neden olabilir. Pratikte, preslere buhar veya harici ısıtıcılar ile ısı desteği sağlanarak özellikle otsu biomassın peletlenmesinde bağlayıcı etkinin artırılması yoluna gidilmektedir (Bajwa vd., 2018).

Peletin çapı ve uzunluğu, yakma sistemlerine uyumluluk açısından standartlara bağlıdır. Yaygın pelet çapları 6, 8 veya 10 mm olup uzunluk genellikle 10-30 mm arasında değişir. Kalıp deliğinin boyu/çap oranı (L/D oranı) arttıkça malzemenin kalıp içinde kalma süresi uzar ve yoğunluk artar; ancak bu aynı zamanda pres gücü ihtiyacını yükseltir. Düşük yoğunluklu, lifli materyallerin peletlenmesinde daha uzun L/D oranlı kalıplar kullanılarak yeterli sıkışma sağlanır (Li vd., 2022).

Peletler kalıptan çıktığında halen sıcaktır ve bağ yapıları tam oturmamıştır. Peletler hava ile temas ederek soğurken içlerindeki suyun bir kısmı buharlaşır ve atmosferik basınç altında bir gevşeme (relaksasyon) meydana gelir. İlk birkaç saat kritik olup, bu süre zarfında peletlerin havada soğuması ve nem dengesine ulaşması sağlanır. Uygun soğutma yapılmazsa, sıcak peletler depoda yığılırsa biçim bozulmaları veya küflenme riski oluşabilir (Stelte vd., 2012). Ticari üretimde soğutma için üfleme soğutucular kullanılarak peletlerin hızlıca ortam sıcaklığına gelmesi sağlanır.

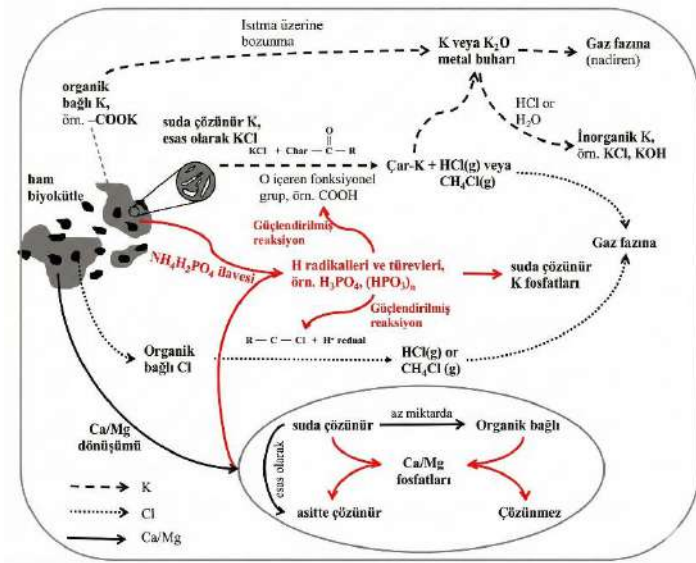
Yukarıda bahsedilen parametrelerin optimum kombinasyonu, her bir hammadde türü için en iyi pelet kalitesini elde etmeye yöneliktir. Pelet kalitesi, genellikle mekanik dayanımı ifade eden “kırılma direnci” veya “dayanıklılık (%)” değeriyle ölçülür. Bu değer, belirli bir titreşim veya düşme testinden sonra sağlam kalan pelet yüzdesini verir. Kaliteli bir pelet için dayanıklılık %95’in üzerinde olmalıdır (Miranda vd., 2015). Ayrıca parça yoğunluğu (gerçek yoğunluk) ve yığın yoğunluğu da kalite göstergesidir; yüksek yoğunluk daha fazla enerji içerdiğini ve sağlam olduğunu gösterir.

ÖN İŞLEMLER VE KATKI MADDELERİ

Ön işlemler, hammaddenin peletlenebilirlik ve yakıt özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan işlemlerdir. Tarımsal atıklar, odunsu biyokütleyle kıyasla bazı dezavantajlara sahip olduğundan ön işlemler büyük önem taşır.

Torrefaksiyon, biyokütlenin 200–300°C sıcaklık aralığında, oksijensiz ortamda kısmi pirolizi anlamına gelir. Torrefaksiyon

sonucunda biyokütlenin yapısı gevşer, hemiselüloz gibi kısımlar parçalanır ve hidrofilik özellik azalır. Elde edilen “biyo-kömür” benzeri torrefiye malzeme, ham haline göre daha yüksek karbon ve enerji içerir, ayrıca su emme eğilimi düşüktür (Picchio vd., 2020). Torrefaksiyon görmüş tarımsal atıkların peletlenmesi durumunda, üretilen peletlerin hidrofobikliği artmakta ve depolama dayanımı iyileşmektedir. Örneğin torrefiye peletler açık havada nem alma konusunda daha kararlı bulunmuştur. Ancak torrefaksiyonun şiddetine bağlı olarak lignin de tahrip olabildiğinden, aşırı torrefiye malzemelerin mekanik dayanımı düşük olabilir (Yıldız ve Topkoç, 2023). Li ve ark. (2022) çalışmasına göre, uygun koşullarda torrefaksiyon uygulamak pelet yoğunluğunu %5’e kadar artırabilirken, aşırı torrefaksiyon pelet dayanıklılığını ciddi oranda azaltmıştır. Dolayısıyla torrefaksiyonun optimum düzeyde uygulanması kritik bir eğilimdir (Şekil 3).



Şekil 3. Torrefaksiyon sırasında inorganiklerin dönüşümünün şematik diyagramı (Li vd., 2022).

Buhar Patlaması, yüksek basınçlı doymuş buhara maruz bırakılan biyokütlenin ani basınç düşüşüyle lif yapısının parçalanması esasına dayanır. Bu işlem, tarımsal atık gibi lifli malzemelerin yapısını kısmen parçalayarak daha kolay sıkıştırılabilir hale getirir. Buhar patlaması sonrasında ligninin yüzeyde yeniden dağıldığı ve peletleme sırasında daha kuvvetli bağlar kurabildiği belirtilmektedir (He vd., 2024). Sonuçta bu yöntemle ön işlem görmüş malzemeden üretilen peletlerin dayanımı ve hacimsel enerji yoğunluğu artabilmektedir.

Kimyasal ön işlemler, biyokütleyle kireç (Ca(OH)_2), asit veya alkali gibi kimyasallar uygulanarak lignin ve selüloz yapısının modifiye edilmesi de çalışılan yöntemlerdendir (Bajwa vd., 2018). Örneğin seyreltik sodyum hidroksit ile muamele, tarımsal atıkların lignoselülozik yapısını şişirerek peletleme basıncını düşürebilir. Ancak kimyasal ön işlemlerin ek maliyet ve çevresel yük getirebileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle pratikte daha çok termal ve mekanik ön işlemler tercih edilir.

Pelet kalitesini artırmak amacıyla kullanılan katkı maddeleri ise iki gruptur: bağlayıcılar ve yağlayıcılar. Bağlayıcı maddeler, pelet içinde bir tür yapıştırıcı rolü oynayarak mekanik dayanımı yükseltir. Nişasta (un, mısır nişastası), melas, lignosülfonat, bitkisel yağlar, parafin, reçine veya biyoplastikler literatürde denenmiş başlıca bağlayıcılardır (Sarker vd., 2023). Örneğin %2-5 oranında nişasta ilavesi, otsu biyokütle peletlerinin dayanıklılığını önemli ölçüde artırabilmektedir (Ribeiro ve Junior, 2023). Benzer şekilde kağıt endüstrisi atığı olan lignosülfonat, %1-3 oranlarında katıldığında pelet sertliğini ve suya dayanımını artıran popüler bir katkıdır. Yağlayıcılar

ise peletleme işlemi sırasında kalıp ve pres yüzeylerindeki sürtünmeyi azaltarak enerji tüketimini düşürmek ve makine aşınmasını azaltmak için kullanılır. En yaygın yağlayıcılar arasında bitkisel yağlar (ör. ayçiçek yağı), balmumu ve stearin bulunur (Sarker vd., 2023). Yağlayıcı katkıları, ayrıca peletleme esnasındaki ısı birikimini azaltarak ürünün termal bozulmasını da önlemeye yardımcı olur. Bunun yanında, bazı yağlayıcılar peletleme sırasında çıkan tozu ve uçucu emisyonları azaltma işlevi de görür.

Katkı maddelerinin kullanımı, tarımsal atık peletlerinin kalitesini odun peletlerine yaklaştırmak için önemli bir stratejidir. Ancak katkıları ek bir maliyet unsuru olduğundan, mümkün olduğunca düşük oranda ve uygun fiyatlı atık veya yan ürünlerden seçilmesi tercih edilir. Örneğin, biyodizel üretiminden kalan ham gliserin veya atık bitkisel yağlar hem ucuz hem de etkili bağlayıcı/yağlayıcı olarak değerlendirilebilir (Kalak, 2023). Son yıllardaki teknolojik eğilimlerden biri de hibrid pelet üretimidir. Örneğin, odunsu atıklarla tarımsal atıkları karıştırarak veya biyokömür ile ham biyokütleyi harmanlayarak pelet üretmek, farklı malzemelerin avantajlarını birleştirmeyi amaçlamaktadır (Rupasinghe vd., 2023). Bu tür kombinasyonlar doğru optimize edildiğinde, yüksek enerji yoğunluklu ve dayanıklı peletler elde etmek mümkün olabilmektedir.

TARIMSAL ARTIKLARDA KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

Odunsu biyokütle (örneğin orman atıkları, talaş) pelet sektöründe en yaygın kullanılan hammaddedir ve bu alanda standartlar büyük ölçüde odun peletlerinin özelliklerine göre şekillenmiştir.

Birçok tarımsal atık (örneğin buğday samanı, mısır sapı) oduna kıyasla daha düşük lignin içerir ve yapısında daha fazla selüloz/hemiselüloz barındırır. Lignin bağlayıcı rol oynadığı için düşüklüğü pelet dayanımını olumsuz etkileyebilir (Stelte vd., 2012). Bu nedenle otsu atıklarda bağlayıcı eklenmesi veya odunsu malzemelerle karıştırma yoluna gidilebilir (Rupasinghe vd., 2023).

Tarımsal kökenli birçok atık, özellikle kabuk ve saplar, oduna göre daha yüksek kül içerir. Örneğin buğday samanının kül içeriği %5-10 arasında olabilirken, temiz odun talaşında bu değer genelde %1'in altındadır (Sezek, 2018). Ayrıca tarım atıklarında potasyum, klor gibi elementler belirgin düzeyde bulunabilir. Bu yüksek kül ve alkaliler, pelet yakıldığında kazanlarda cürufanma/curuf ve korozyon problemlerine yol açabilir (Miranda vd., 2015). Bu nedenle tarımsal peletlerin özellikle endüstriyel ölçekli yakma sistemlerinde kullanımı için ön arıtma (ör. yıkama ile klor giderimi) veya uygun brülör tasarımı gerekmektedir.

Tarımsal atıklar genelde hacimli ve düşük yoğunlukludur. Sap ve yaprak gibi malzemeler presleme esnasında geri esneme eğilimi gösterebilir, bu da yoğun pelet oluşumunu zorlaştırır. Lifli yapı, presleme cihazlarında besleme sorunlarına da yol açabilir. Bu nedenle ön öğütme ve nem ayarı tarımsal atıklarda kritik önemdedir (Yılmaz, 2025). Gerekirse peletleme öncesi malzeme kısa süreliğine nemlendirilip bekletilerek (şartlandırma) daha kolay şekil alması sağlanabilir.

Tarımsal atıkların kimyasal ve fiziksel özellikleri ürün türüne, yetiştiği toprağa, hasat mevsimine göre değişebilir. Örneğin aynı

tarladan alınan buğday sapının bile bir kısmı yağmur görmüşse kül ve nem oranı farklı olacaktır. Odun hammaddesinde dahi türler arası farklar varken, tarımsal atıklarda standardizasyon daha güçtür. Bu durum pelet kalitesinde parti bazında dalgalanmalara neden olabilir. Bu zorluğu aşmak için hammadde depolama ve karıştırma stratejileri, sürekli kalite kontrol ve gerekirse karışım pelet üretimi uygulanabilir (Rupasinghe vd., 2023).

Yukarıdaki zorluklar, tarımsal atıklardan pelet üretiminin teknik olarak daha karmaşık olabileceğini göstermektedir. Ancak uygun teknikler ve işlemlerle bu atıklardan da standartlara yakın kalitede peletler üretmek mümkündür.

FARKLI HAMMADDELERDEN ELDE EDİLEN BİYOPELETLERİN ÖZELLİKLERİ

Tarımsal atıklar geniş bir yelpazeye sahiptir ve her birinin pelet yakıt olarak özellikleri farklılık gösterir. Odunsu atıklar (budama artıkları, meyve ağacı dalları vb.) lignin oranının yüksek ve kül miktarının görece düşük olması sayesinde genellikle kaliteli pelet vermektedir. Otsu ve kabuklu atıklar ise (sap, saman, çekirdek kabuğu, prina gibi) daha problemli yakıt özelliklerine sahip olabilir. Yıldız ve Topkoç'un (2023) yedi farklı biyopelet türü üzerinde yaptığı karşılaştırmalı çalışmada bu durum açıkça görülmüştür. Çalışmada incelenen pelet türleri sera atıkları, odunsu orman atıkları, çam odunu, çam talaşı+MDF karışımı, ayçiçeği kabuğu, fındık işleme küspesi ve kavak odunu+kozalak karışımıdır. Elde edilen peletlerin özellikleri uluslararası standart limitleriyle karşılaştırılmıştır. Standartlara göre 6–

10 mm çap, 3,15–40 mm uzunluk, %7–12 nem, %0,5–2 kül ve 16,5–19,5 MJ/kg ısıı değer aralığı kaliteli pelet için öngörülmektedir. İncelenen numunelerden odunsu atık peleti ve kavak+kozalak peleti bu kriterlere en yakın değerlere sahip olmuş; diğer tarımsal pelet türlerinde ise özellikle kl içeriği ve nem gibi parametrelerde sapmalar görülmüştür. Örneğin ayçiçeği kabuğu ve fındık kspesti peletlerinde kül oranı sırasıyla %8-18 gibi çok yüksek değerlere ulaşmış, bu da standart st sınır olan %2'yi katbekat aşmıştır. Sera bitki atıklarından üretilen peletlerde ise nem %17'lere varmış ve ısıı değer alt sınırın altında kalmıştır. Buna karşın odunsu pelet ve kavak+kozalak peleti %0,5-1 kül ile yüksek ısıı değer göstererek standartlara uygun bulunmuştur. Bu bulgular, hammadde türünün pelet yakıt kalitesini doğrudan etkilediğini ve odunsu/ıgneli yapraklı ağaç atıklarının tarımsal kaynaklılara göre daha temiz yakıt verdiğini ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, Develi ve ark. (2021) Antep fıstığı kabuğu (sert kabuklu bir atık) ve zeytin fabrikası posası (prina) karışımlarından pelet elde ettikleri çalışmada, farklı karışım oranlarının pelet kalitesine etkisi incelenmiştir. %100 fıstık kabuğu, %100 prina ve çeşitli oranlarda karışımlar peletlenerek fiziksel ve kimyasal özellikler analiz edilmiştir. Sonuçlara göre fıstık kabuğu, yüksek lignin içeriği sayesinde tek başına en dayanıklı peleti vermiştir: %100 fıstık kabuğu peletinin kırılma dayanımı %99,9 gibi çok yüksek bir değerde bulunmuştur. Buna karşılık %100 zeytin prinasından yapılan peletin dayanımı biraz daha düşük çıkmış, fıstık kabuğu oranı azaldıkça dayanıklılık eğilimi azalmıştır. İlginç olarak, karışım peletlerinde %50-%50 oranındaki

pelet en kırılganı olmuş, %100 fıstık kabuğu ise en sağlamı olarak kayda geçmiştir. Bu durum iki malzeme arasında optimal bir sinerji olmadığını, aksine tam saf hallerinin daha iyi sonuç verdiğini gösterebilir. Fıstık kabuğu peletlerinin yoğunluğu da en yüksek (yaklaşık 1,19 g/cm³) ölçülürken, prina içeriği arttıkça yoğunluk bir miktar düşmüştür. Tüm karışımlar için pelet yoğunluğu 970–1190 kg/m³ aralığında yer almış olup, bu değerler oldukça iyidir ve uluslararası pelet standartlarındaki 600–700 kg/m³ alt sınırının epey üzerindedir. Yine de prina içerikli peletlerin dezavantajı, kül ve nem alma oranlarındaki artış olarak görülmüştür. %100 prina peletinde nem çekme oranı %22'ye yaklaşarak %100 fıstık kabuğuna göre (~%19) daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca peletlerin kül içerikleri fıstık kabuğu için %6 civarı iken, prina için %10'u aşmıştır. Bu sonuçlar, zeytin prinası gibi atıkların yüksek kül ve nem tutma eğilimi nedeniyle saf halde pelet yakıt olarak zayıf kalabileceğini, ancak sert kabuklu atıklarla karıştırarak kısmen iyileştirilebileceğini düşündürmektedir.

Literatürde başka birçok tarımsal atık kaynaklı pelet çalışması mevcuttur. Örneğin pirinç kabuğu, mısır koçanı, buğday samanı, pamuk sapı, kahve posası gibi atıkların peletlenebilirliği araştırılmıştır (Bajwa vd., 2018; Sarker vd., 2023). Genel eğilim, bu tür atıklardan elde edilen peletlerin ısı değerlerinin 15–18 MJ/kg civarında, yoğunluklarının 1000–1250 kg/m³ aralığında ve dayanımlarının %90-97 bandında olduğudur. Odun peletleri tipik olarak ~18-19 MJ/kg ısı değere ve >%97 dayanıklılığa sahip olduğundan, bazı tarımsal peletler bu değerlere yaklaşabilirken bazıları geride kalmaktadır. Özellikle kahve posası veya ceviz kabuğu gibi yağ içerikli atıklardan yapılan peletler

oldukça yüksek kalorifik değere (19-20 MJ/kg) ulaşabilirken, buğday samanı gibi lignin fakiri materyallerin peletleri genelde 15-16 MJ/kg'da kalır (Miranda vd., 2015). Kül içeriği de yine kritik bir farklılıktır: Odun peletinde çoğu zaman %1'in altında olan kül, tarımsal peletlerde %3-10 arasında olabilir (Yıldız ve Topkoç, 2023). Bu da tarımsal peletleri mevcut ENplus A1/A2 gibi premium pelet standartlarının dışında bırakmaktadır. Ancak endüstriyel yakıt olarak veya karışım yakıt olarak kullanım için bu değerler kabul edilebilir olabilmektedir.

İŞLEM PARAMETRELERİ VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ETKİLERİ

Farklı araştırmacılar, peletleme parametreleri ve ön işlem/katkı uygulamalarının ürün üzerindeki etkilerini de nicel olarak ortaya koymuştur. Örneğin, Kaliyan ve Morey'nin (2009) çalışmasında çeşitli biomateryallerin pelet dayanımına etki eden faktörler istatistiksel modellerle analiz edilmiştir. Sonuçlar, hem nem hem de basıncın önemli derecede etkili olduğunu; fakat her malzeme için optimum noktaların değiştiğini göstermektedir. Genel olarak %10 civarı nem ve >100 MPa basınç ortak payda olarak öne çıkmaktadır. Daha güncel olarak, He vd. (2024) tarafından yapılan derlemede, lif oryantasyonunun ve parçacık şeklinin bile pelet yoğunluğuna etki edebileceği vurgulanmıştır. Uzun ve sert liflerin peletleme öncesi kırılarak kısaltılması, pres sırasında daha düzgün bir yığın oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca peletleme ekipmanındaki sıkıştırma oranının (L/D) arttırılmasının özellikle düşük yoğunluklu tarımsal atıklar için

nihai pelet yoğunluğunu belirgin şekilde iyileştirdiği rapor edilmiştir (Li vd., 2022).

Katkı maddelerinin somut etkisine dair literatürde birçok örnek bulunur. Sarker ve ark. (2023), farklı biyokütle türlerinde kullanılan bağlayıcı katkıları derlemiş ve çoğunlukla %2–5 aralığındaki organik katkıların pelet kalitesine olumlu yansıdığını belirtmiştir. Örneğin nişasta katkısı, pirinç kabuğu peletinde dayanımı %85’ten %95’e çıkarabilmektedir. Benzer şekilde %1 oranında eklenen kireç taşı tozu, fındık kabuğu peletinde kül ergime sıcaklığını yükselterek yakma sırasında cüruf oluşumunu azaltmıştır (Bajwa vd., 2018). Bu tür bulgular, her bir atık için uygun katkı veya karışım tasarımının, yakıt performansını artırmada anahtar olabileceğini göstermektedir.

Torrefaksiyon ve ön ısıtma uygulamalarının etkileri de deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Örneğin, hafif torrefiye edilmiş (240°C’de 30 dakika) çam talaşı peletlerinin, ham talaş peletlerine göre %5 daha yüksek enerji yoğunluğuna ve suya karşı belirgin derecede dirençli bir yapıya sahip olduğu bildirilmiştir (Li vd., 2022). Ancak aynı çalışmada yüksek sıcaklıkta torrefaksiyonun (%30’luk kütle kaybı olacak seviyede) pelet dayanımını %80’lerden %15’e kadar düşürdüğü görülmüş, yani pelet neredeyse dağılacak hale gelmiştir. Bu, aşırı ısıtma işlem sonucunda ligninin yapıştırıcı özelliğini kaybetmesiyle açıklanabilir. Dolayısıyla torrefaksiyonun optimum noktası her malzeme için bulunmalı; gerekirse torrefiye malzemeye bir miktar ham öğütü veya bağlayıcı karıştırılarak peletlenmelidir. Nitekim Rupasinghe ve ark. (2023) odunsu ve otsu biyokütle karışımlarından pelet üretimine dair yaptıkları meta-analizde, karışım stratejisinin çok

etkili bir iyileştirme yöntemi olabileceğini göstermişlerdir. Örneğin %20 oranında yumuşak odun talaşı eklenen buğday samanı peletlerinin dayanımı ve enerji içeriği, saf saman peletine göre anlamlı derecede yükselmiştir. Bu sonuç, odunun içerdiği lignin ve düşük kül sayesinde karışıma pozitif katkı yaptığını gösterir.

Diğer yandan, ekipman geliştirmeleri de literatürde tartışılmaktadır. Yeni nesil pelet değirmenlerinde değişken hız kontrolü, akıllı besleme sistemleri ve kalıp sıcaklık kontrolü gibi özelliklerle daha stabil üretim mümkün olmaktadır (He vd., 2024). Örneğin bazı modern preslerde, malzeme akışındaki değişime göre basınç otomatik ayarlanmakta ve böylece değişken nemli hammadde işlense bile tutarlı kalite elde edilebilmektedir (Rajmohan vd., 2021). Ayrıca peletleme sırasında oluşan ince tozun cyclon filtrelerle anında ayrılması ve tekrar prosese döndürülmesi gibi uygulamalar da verimi yükseltmektedir (He vd., 2024). Sonuç olarak, literatürdeki bulgular genel olarak tarımsal atık peletlerinin uygun şartlar sağlandığında tatmin edici özellikler gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak ham maddeye özgü sorunlar ve iyileştirme yöntemleri dikkatlice ele alınmalıdır.

TARTIŞMA

Tarımsal atıklardan biyopelet üretimi, literatür bulgularının da teyit ettiği üzere hem fırsatlar hem de bazı güçlükler barındırmaktadır. Güncel durumu değerlendirirsek, teknoloji cephesinde önemli ilerlemeler kaydedildiği görülmektedir. Öncelikle, daha önce odun peletine odaklanan endüstri ve standartlar, artık farklı biyokütleleri de

kapsayacak şekilde genişlemektedir. Avrupa'da ISO 17225-6 standardı, “tarımsal ve bahçe biyokütlesinden pelet yakıt” için özel sınıflar tanımlayarak bu alandaki boşluğu doldurmaya çalışmıştır (Yıldız ve Topkoç, 2023). Bu standarda göre kül içeriği %7’ye kadar olan veya klor içeriği %0,10’a kadar çıkabilen tarımsal peletlere tolerans tanınmıştır. Bu gelişme, tarımsal peletlerin de pazarda yer bulabilmesi adına önemlidir. Ancak halen yüksek kül ve kükürt içerikli peletlerin kullanımı sınırlı kalmakta, özellikle küçük ölçekli son kullanıcılar kaliteli odun peletini tercih etmektedir. Dolayısıyla teknolojik eğilimler, tarımsal peletleri daha temiz ve kararlı hale getirmeye odaklanmıştır.

Bu amaçla ön plana çıkan eğilimlerden biri dairesel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz yaklaşımlarıdır. Örneğin gıda ve tarım endüstrilerindeki organik atıkların enerji sektörüne girdi olması, atık bertaraf maliyetini azaltırken enerji üretimini destekleyen bir kazan-kazan durumu yaratır. Türkiye orman ürünleri sektörü için yapılan bir değerlendirmede, ahşap artıklarının pelet fabrikalarına hammadde olması ve çıkan külün tekrar gübre olarak tarıma dönmesi gibi döngüsel modeller önerilmiştir (Yeşilkaya vd., 2023). Benzer şekilde, tarım serası atıkları veya gıda işleme yan ürünleri (örneğin fındık içi üretiminde çıkan zuruf, meyve posaları) bölgesel pelet tesisleri ile değerlendirilip yakın çevredeki işletmelere ısı/elektrik sağlayabilir. Bu tip yaklaşımlar güncel literatürde “sürdürülebilir biyoyakıt tedarik zinciri” ve “yerel enerji döngüleri” kavramlarıyla ele alınmaktadır (Svensson vd., 2024).

Teknolojik trendlerin bir diğeri yönü, yakma ve kullanım tarafındaki gelişmelerdir. Yüksek kül içeren tarımsal peletlerin sorunsuz yakılabilmesi için kazan tasarımlarında yenilikler yapılmaktadır. Örneğin hareketli ızgaralı ve kül üfleme sistemli kazanlar, saman peleti gibi problemli yakıtları bile tıkanma olmadan yakabilecek şekilde tasarlanmaktadır (Rajmohan vd., 2021). Ayrıca pelet yakmada gazifikasyon sistemleri de gündemdedir. Kısmi yanma ile pirolitik gaz elde eden pelet gazifikatörleri, ham peletin sorunlu külünü ayrı alarak daha temiz gaz yakabilir (Kalak, 2023). Bu, özellikle tarım atığı peletlerinin verimli değerlendirilmesi için bir fırsattır.

Teknolojik eğilimler özetlenecek olursa:

- Üretim ekipmanları akıllı kontrol sistemleriyle donatılarak ham maddedeki dalgalanmalara rağmen sabit kalite tutturmaya yönelik geliştirilmektedir.
- Pelet kullanım alanları genişlemekte; küçük çiftliklerden büyük termik santrallere kadar farklı ölçeklere uygun cihazlar piyasaya çıkmaktadır.
- Standardizasyon ve sertifikasyon çalışmaları tarımsal kökenli peletleri de içerecek şekilde ilerlemektedir.
- Bütünleşik biyorefineri yaklaşımlarında, örneğin bir biyogaz tesisinin posa çıktısını peletleme veya bir bioetanol tesisinin lignin atığını pelet yakıt yapma gibi entegre çözümler denenmektedir (Rajmohan vd., 2021).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarımsal atıklardan biyopelet üretimi, yenilenebilir enerji hedefleri ve atık yönetimi açısından önemli bir fırsattır. Bu bölümde literatür taramasına dayanarak incelenen konular göstermektedir ki uygun tekniklerle tarımsal biyokütleler yüksek kaliteli pelet yakıtlara dönüştürülebilir. Pelet haline getirme işlemi, gevşek ve düşük yoğunluklu atıkları istikrarlı, yoğun ve kullanışlı bir yakıta çevirmekte; böylece hem çevresel kirliliğin önlenmesi hem de fosil yakıtlara alternatif yerli enerji üretimi sağlanmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle peletlemenin teknik prensipleri ve kalite parametreleri ele alınmış, ardından farklı hammaddeler ve yöntemlere dair bulgular incelenmiştir. Tarımsal atık kaynaklı peletlerin genellikle odun peletlerine kıyasla daha yüksek kül içerdiği, yakma sırasında cüruf oluşumu ve emisyonlar açısından daha dikkat gerektirdiği anlaşılmaktadır. Ancak belirli oranlarda karıştırma, ön işlem uygulama (ör. torrefaksiyon) ve bağlayıcı katkılar kullanma sayesinde birçok tarımsal atık için uluslararası standartlara yakın pelet özellikleri yakalanabilmiştir. Örneğin fıstık kabuğu, zeytin prinası, ayçiçeği kabuğu, fındık zurufu gibi Türkiye’de bol bulunan atıklar üzerinde yapılan çalışmalar, doğru koşullar sağlandığında yüksek yoğunluklu (%97–99 dayanımlı) pelet yakıt elde edilebildiğini ortaya koymaktadır. Bu da ülkemizde ve dünyada atıl durumdaki tarımsal artıkların enerjiye kazandırılması için pratik bir yol sunmaktadır.

Torrefaksiyon, buhar patlaması gibi yöntemlerin tarımsal atıklar için ekonomik uygulanabilirliği araştırılmalıdır. Düşük maliyetli ve sürekli işletmeye uygun ön işlem ekipmanları (örneğin atık ısıyla

alışan kurutucu-torrefaktr sistemleri) geliştirilmesi önemlidir. Bu sayede zor peletlenebilen atıklar bile yüksek kalitede pelete dönüştürülebilir.

Hangi atık için hangi bağlayıcı veya katkının ideal olduğu konusunda yol gösterici çalışmalar yapılmalıdır. Örneğin yüksek kül içerikli sap-saman peletlerine %1-2 kireç taşı ilavesinin emisyonları azaltabileceği veya düşük ligninli bitki atıklarına nişasta eklenmesinin dayanımı artıracaağı gibi bulgular, bilimsel yayımlar haline getirilerek üreticilere sunulmalıdır. Bu, sektörde standardizasyonu ve kaliteyi artıracaktır.

Ulusal ve uluslararası standartların tarımsal peletleri kapsayacak şekilde güncellenmesi devam etmelidir. Türkiye’de üretilen biyopeletlerin kalite kontrolü için laboratuvar altyapıları kurulmalı, üreticilere sertifikasyon mekanizmaları oluşturulmalıdır. Böylece kullanıcılar tarımsal peletlerin güvenilirliğinden emin olabilir.

Teknolojik gelişmeler devam etmekte ve araştırmalar genişlemektedir. Gelecek yıllarda, gelişmiş peletleme teknikleri ve entegre biyokütle enerjisi politikaları sayesinde tarımsal atıkların enerji üretimindeki payının kayda değer ölçüde artacağı öngörülmektedir. Bu da daha temiz bir evre, daha güçlü bir kırsal ekonomi ve fosil yakıtlara bağımlılığın azalması anlamına gelecektir.

KAYNAKÇA

- Azargohar, R., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2018). Densification of agricultural wastes and forest residues: A review on influential parameters and treatments. Recent advancements in biofuels and bioenergy utilization, 27-51. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1307-3_2
- Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J., & Bajwa, S. G. (2018). A review of densified solid biomass for energy production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96, 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- Develi, H. C., Aybek, A., & Üçok, S. (2021). Antep fıstığı kabuğu ve zeytin küspesinden biyoyakıt amaçlı pelet elde edilmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 18(4), 689-701. <https://doi.org/10.33462/jotaf.891249>
- He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., & Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. Biomass and Bioenergy, 186, 107271. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107271>
- Ibitoye, S. E., Jen, T. C., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. Bioresources and bioprocessing, 8(1), 75. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- Kalak, T. (2023). Potential use of industrial biomass waste as a sustainable energy source in the future. Energies, 16(4), 1783. <https://doi.org/10.3390/en16041783>

- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 337-359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Li, W., Wang, M., Meng, F., Zhang, Y., & Zhang, B. (2022). A review on the effects of pretreatment and process parameters on properties of pellets. *Energies*, 15(19), 7303. <https://doi.org/10.3390/en15197303>
- Manickam, I. N., Ravindran, D., & Subramanian, P. (2006). Biomass densification methods and mechanism. *Cogeneration and distributed generation journal*, 21(4), 33-45. <https://doi.org/10.1080/15453660609509098>
- Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., & Nogales, S. (2015). A review of pellets from different sources. *Materials*, 8(4), 1413-1427. <https://doi.org/10.3390/ma8041413>
- Mortadha, H., Kerrouchi, H. B., Al-Othman, A., & Tawalbeh, M. (2025). A comprehensive review of biomass pellets and their role in sustainable energy: production, properties, environment, economics, and logistics. *Waste and Biomass Valorization*, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02873-x>
- Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., & Pari, L. (2020). Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. *Energies*, 13(11), 2937. <https://doi.org/10.3390/en13112937>
- Rajmohan, K. S., Ramya, C., & Varjani, S. (2021). Trends and advances in bioenergy production and sustainable solid waste management.

- Energy & Environment, 32(6), 1059-1085.
<https://doi.org/10.1177/0958305X1988241>
- Ribeiro, G. F., & Junior, A. B. (2023). The global energy matrix and use of agricultural residues for bioenergy production: A review with inspiring insights that aim to contribute to deliver solutions for society and industrial sectors through suggestions for future research. *Waste Management & Research*, 41(8), 1283-1304.
<https://doi.org/10.1177/0734242X231154149>
- Rupasinghe, R. L., Perera, P., Bandara, R., Amarasekera, H., & Vlosky, R. (2023). Insights into properties of biomass energy pellets made from mixtures of woody and non-woody biomass: a meta-analysis. *Energies*, 17(1), 54.
<https://doi.org/10.3390/en17010054>
- Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264.
<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01510-0>
- Sezek, M. (2018). Endüstri Bitkileri ve Bitki Artıklarının Biyoyakıt Olarak Kullanımı. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 33(1), 105-111. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.348459>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization-a review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490.
<https://doi.org/10.15376/biores.7.3.4451-4490>
- Svensson, A., Almarstrand, M., Axelsson, J., Nilsson, M., Timmermann, E., & Govindarajan, V. (2024). Valorising

- Agricultural Residues into Pellets in a Sustainable Circular Bioeconomy. *Problemy Ekorozwoju*, 19(2). <https://doi.org/10.35784/preko.5808>
- Yeşilkaya, M., Daş, G. S., & Yaşın, M. F. (2023). Türkiye orman ürünleri sektörünün döngüsel ekonomi ve endüstriyel simbiyoz bağlamında değerlendirilmesi. *Journal of Turkish Operations Management*, 7(2), 1701-1723. <https://doi.org/10.56554/jtom.1169240>
- Yıldız, Z., & Topkoç, E. (2023). Tarımsal atıklardan elde edilen biyopeletlerin bazı yakıt özelliklerinin uluslararası pelet standartları ile karşılaştırılması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 24(2), 1-9. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.1231448>
- Yılmaz, A. E. (2025). Çevresel Sürdürülebilirlik Açısından Tarımsal Atıkların Değerlendirilmesi. *Journal of Ecological Harmony*, 1(1), 32-39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15754960>

BÖLÜM 10

ÇELTİK TARIMINDA DRONE VE MAKİNE İLE EKİM OLANAKLARININ BİTKİNİN BAZI ÖZELLİKLERİNİ ÜZERİNE ETKİSİ¹⁻²

Nihat Bora ATMACA

Prof. Dr. Yılmaz BAYHAN*

GİRİŞ

Çeltik (*Oryza sativa*), dünya nüfusunun büyük bir kısmı için temel besin kaynağı olan eski bir kültür bitkisidir. Gen merkezi Güneydoğu Asya olarak kabul edilen çeltik, ülkemize yaklaşık 500 yıl önce gelmiştir. Dünyadaki nüfus artış hızı göz önüne alındığında, 2030 yılı itibariyle çeltik üretiminin %50 oranında artırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çeltik üretimi, dünya genelinde çoğunlukla tropikal ve subtropikal iklim bölgelerinde yapılmaktadır. Başlıca üreticiler arasında Çin, Hindistan, Endonezya, Bangladeş ve Vietnam yer almaktadır. Türkiye, coğrafi açıdan çeltik tarımına uygun olan geniş bir alana sahip olup, Trakya ve Marmara bölgeleri çeltik üretiminin %56'sını oluştururken, Karadeniz Bölgesi %36,5'lik bir paya sahiptir. Çeltik, bileşiminde bulunan proteinler ve amino asitler sayesinde buğdaydan sonra en yaygın tüketilen ürünlerden biridir. Yüksek kaliteli pirinç üretimi, doğru çeşidin seçimi, ekim zamanı, tarla hazırlığı, gübreleme, zirai ilaç kullanımı, sulama, hasat ve depolama gibi birçok faktöre bağlıdır. Çeltik üretimi sırasında elde edilen yan ürünler, pirinç kabuğu, pirinç kepeği ve pirinç unu gibi çeşitli formlarda değerlendirilir. Çeltik, genellikle 45 derece kuzey ve 35 derece güney

¹Bu çalışma Yüksek Lisans Tezinden Üretilmiştir.

²Bu çalışmanın özeti 36. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nde (10-12 Eylül 2025, Mardin) sözlü olarak sunulmuştur.

enlemleri arasında ve denizden 1500 metreye kadar olan alanlarda yetişmektedir.

Çeltik tarımında geleneksel olarak ekim elle serpmeye yöntemi kullanılmaktadır. Alternatif olarak ekim makinası ile ekim ve son yıllarda ise insansız hava araçları (drone) yöntemi uygulanmaktadır. Elle serpmeye ekimi, iş gücü gereksinimi yüksek olmasına rağmen bazı bölgelerde tercih edilmektedir. Makine ekimi ise daha hızlı ve verimli olup, makine ile kullanım daha önder çiftçiler tarafından kullanılmaktadır. Son yıllarda ise teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, drone teknolojisinin çeltik tarımında kullanımı yapılmaktadır. Çeltik üretiminde güncel tarım teknolojileri, su kullanımını daha verimli hâle getirirken tarımsal ilaçlama işlemlerini de kolaylaştırmaktadır. Yurt dışında yaygın olarak uygulanan insansız hava araçları ve benzeri sistemler, Türkiye’de de üretim pratiklerini dönüştürmüştür. Bu araçlar sayesinde ilaçlar yalnızca hedef alanlarda uygulanmakta, gereksiz kullanım önlenmekte ve maliyetler düşürülmektedir. Ayrıca, traktörlerin ulaşamadığı dik ve sulak arazilerde bile etkili müdahaleler yapılabilmektedir. Bu sistemler ile yapılan ilaçlamalar, geleneksel yöntemlere kıyasla zamandan ciddi tasarruf sağlamakta ve su tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır; bu durum özellikle suyun sınırlı olduğu bölgeler için büyük avantaj sunmaktadır.

Modern uygulamalar, tarlada eşit ilaç dağılımı sağlayarak bitkilerin sağlıklı gelişimini destekler ve verim artışına katkıda bulunur. Toplanan verilerin gerçek zamanlı analiz edilmesi, çiftçilerin tarla koşullarını yakından takip etmesine ve zamanında müdahalede bulunmasına imkân tanır. Aynı zamanda operatörlerin doğrudan kimyasal maddelerle temasını önleyerek iş güvenliğini artırır. Makine ile ekim, çeltik üretiminde iş yükünü azaltan ve ekim verimliliğini artıran bir diğer yöntemdir. Büyük makinelerle gerçekleştirilen toprak işleme ve ekim, geniş arazilerde hızlı ve düzenli uygulama sağlar. Bu yaklaşım, su kullanımının optimize edilmesine de katkıda bulunur. Elle serpmeye ekim ise özellikle küçük ölçekli işletmelerde tercih edilen geleneksel bir yöntemdir. Bu yöntemde tohumlar manuel olarak tarlaya serpilir ve su ile kaplanır. İş gücü ihtiyacı yüksek olmakla birlikte, genellikle makine ile ekime kıyasla daha düşük verim sağlar. Yine de

küçük çiftçiler, düşük maliyetli bir seçenek olarak bu yöntemi kullanmaya devam etmektedir.

Sonuç olarak, çeltik üretiminde verimlilik ve kaynak kullanımını optimize etmek için teknolojik yöntemlerin önemi giderek artmaktadır. İnsansız hava araçları ve drone benzeri sistemler, su yönetiminde avantaj sağlarken ilaçlama süreçlerini de hızlandırmakta ve daha etkin hâle getirmektedir. Makine ile ekim, geniş alanlarda düzen ve hız sağlarken, elle serpme ekim hâlen düşük maliyetli bir alternatif olarak önemini korumaktadır. Gelecekte, teknolojik yaklaşımların daha yaygın kullanılması ve farklı yöntemlerin bir arada uygulanmasıyla üretimde önemli gelişmeler beklenmektedir. Bu tezde, çeşitli ekim yöntemleri karşılaştırılacak ve söz konusu teknolojilerin çeltik üretimindeki katkıları ayrıntılı olarak incelenecektir.

1.1 Literatür Özeti

1995–1996 yıllarında Samsun’da yürütülen bir araştırmada, farklı çeltik çeşitlerinin ve ekim yöntemlerinin verim ve kalite özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada tesadüf blokları deneme deseninde, üç tekerrürlü olarak farklı çeltik çeşitleri değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar ekim yöntemleri ile çeşitler arasındaki etkileşimin verim açısından önemli olduğunu göstermiştir. Araştırmada ayrıca kırksız pirinç randımanı yönünden de belirli farklılıklar tespit edilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, fideleme yönteminde K-424 çeşidinin, serpme ekimde ise K-424, Baldo ve Ribe çeşitlerinin tercih edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Şavşatlı ve Gülümser, 2005).

Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü’nde yürütülen başka bir çalışmada, farklı ekim yöntemlerinin çeltik çeşitlerinde verim ve tarımsal özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Denemede, ön çimlendirilmiş serpme ekim ve ön çimlendirilip kurutulmuş tohumla sıraya ekim yöntemleri en yüksek tane verimini sağlamış, diğer yöntemlerle kıyaslandığında verim açısından açık avantaj sunmuştur. Çeşitler arasında farklılıklar gözlenmiş olmakla birlikte, ekim yöntemi ile çeşitler arasındaki etkileşim istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Fide dikimi yapılan uygulamalarda, çiçeklenme ve

olgunlaşma süresi, salkım uzunluğu ve hasat indeksi gibi bazı parametrelerde artış gözlenmiştir (Başer ve Gençtan, 1996).

2015–2016 yıllarında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Tarımsal Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde gerçekleştirilen bir çalışmada, sekiz farklı çeltik çeşidinin makineli fideleme ve elle serpmeye ekim yöntemleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Araştırmada bitki boyu, salkım uzunluğu, salkımda tane sayısı, tane verimi, bin tane ağırlığı ve kırksız pirinç randımanı gibi altı parametre değerlendirilmiş ve sonuçlar, ekim yöntemleri ve çeşitler arasında belirgin farklılıklar olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, farklı ekim yöntemlerinin çeltik verimi ve kalite parametreleri üzerindeki etkilerini somut olarak ortaya koymuştur (Sezer vd., 2017).

Malezya’da yapılan bir araştırmada, çeltik tarımında dron kullanımının çiftçi tarafından kabulünü etkileyen faktörler incelenmiştir. Çalışmada dronun rolleri ve kullanım becerisi, çiftçi kabulünü yüksek düzeyde etkileyen başlıca faktörler olarak belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, çiftçilerin dron kullanımına karşı olumlu bir yaklaşım sergilediğini ve bu teknolojiyi tarımsal faaliyetlerine entegre etmeye istekli olduklarını göstermiştir. Bu durum, dron teknolojisinin tarımsal üretimde potansiyel faydalarını ortaya koymaktadır (Azizul vd., 2023).

John Deere 5625 traktör ile santrifüj ekim makinesi kullanılarak yapılan bir çalışmada, insan iş gücü ile makine kullanımının maliyet etkinliği karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, makineli ekim yönteminin hem maliyet hem de zaman açısından daha ekonomik olduğunu ortaya koymuştur. Araştırma, mekanizasyonun çeltik üretiminde sağladığı verimlilik avantajını açıkça göstermektedir (Çiçek ve Sümer, 2009).

Çorum ili Osmancık ilçesinde gerçekleştirilen başka bir çalışmada, çeltik üretiminde enerji girdileri ve çıktıları belirlenmiş, üretimin enerji etkinliği değerlendirilmiştir. Sulama, yakıt-yağ ve elektrik kullanımının toplam enerji tüketiminde en yüksek paya sahip olduğu tespit edilmiş, dron ile ilaçlamanın da enerji analizine dahil edilmesinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Araştırma, enerji

tasarrufunu artırmak için sulama yöntemlerinin ve teknolojik uygulamaların önemini ortaya koymaktadır (Hacıoğlu vd., 2023).

Diyarbakır ili Karacadağ Bölgesi'nde yapılan bir çalışmada, biçerdöverle hasat sırasında oluşan dane kayıpları incelenmiş ve ürün nemi, ilerleme hızı ile batör devir sayısının kayıp oranını etkilediği belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, batör devir sayısının artmasıyla hasat kaybının da anlamlı şekilde yükseldiğini göstermiştir. Bu bulgular, biçerdöverle hasatta uygun parametrelerin belirlenmesinin verim kayıplarını azaltmada kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır (Esgici ve Özcan, 2012).

Pirincin ekiminde kullanılan otonom drone sistemlerinin uçuş parametreleri incelenmiş ve drone'ların 3 m/s hız ve 5 m yükseklik aralığında en verimli tohum dağılımını sağladığı bulunmuştur. Ayrıca, GPS destekli navigasyon sistemlerinin tohum homojenliğini %20'ye kadar iyileştirdiği tespit edilmiştir (Zhang vd., 2023).

Makine ile doğrudan ekim sistemleri drone teknolojisiyle karşılaştırılmış, mekanik sistemlerin tohum derinliği açısından daha tutarlı olduğu, drone tabanlı sistemlerin ise zamandan %50 tasarruf sağladığı ve enerji verimliliği açısından hektar başına %18 daha az yakıt tükettiği gözlenmiştir (Wang ve Chen, 2024).

Japonya'da yapılan bir çalışmada, drone tabanlı pirinç ekiminin sulama düzenine etkileri incelenmiş ve tohumların yüzeyde homojen dağılması sayesinde suyun daha etkin kullanıldığı, toplam su tüketiminin %12 azaldığı belirlenmiştir (Kawamura vd., 2022).

Vietnam'da üç farklı drone tipiyle yapılan pirinç ekim denemelerinde uçuş rotası ve hava akımı parametrelerinin çıkış oranına etkisi değerlendirilmiş ve çok rotorlu sistemlerin dağılım kalitesini artırdığı bulunmuştur (Nguyen vd., 2025).

Hindistan'da yapılan saha denemelerinde, mekanik fide dikim makinelerinin bazı bölgelerde verimi %25 artırdığı, ancak engebeli arazilerde drone ekim sistemlerinin daha etkin olduğu gözlenmiş ve gelecekte hibrit sistemlerin çeltik üretiminde standart hale gelmesinin öngörüldüğü belirtilmiştir (Singh ve Patel, 2023).

Çin'de yürütülen bir çalışmada, yapay zekâ destekli bir drone kontrol yazılımı geliştirilmiş ve tohum yoğunluğu sensörlerinden gelen verinin analiziyle uçuş esnasında tohum çıkış oranının gerçek zamanlı

optimize edildiği, manuel kontrol sistemlerine göre %17 daha yüksek çıkış oranı elde edildiği tespit edilmiştir (Chen ve Li, 2025).

Endonezya’da yapılan araştırmada, drone ve mekanik ekim yöntemlerinin maliyet analizinde, drone ekiminin başlangıçta yüksek ekipman maliyetine sahip olduğu, ancak uzun vadede hektar başına işçilik maliyetini %40 azalttığı ve tohum israfını önleyerek toplam üretim maliyetinde %10 tasarruf sağladığı belirlenmiştir (Anonim, 2024).

Frontiers in Sustainable Agriculture dergisinde yayımlanan bir çalışmada, drone ekim sonrası çeltik bitkilerinin yoğunluğu uydu görüntüleri ve yapay zekâ ile analiz edilmiş ve çıkış oranı ile verim tahmini doğruluğunun %93 seviyesine ulaştığı bulunmuştur (Anonim, 2025).

1.2 Çeltiğin Tarımsal Üretim Süresindeki Aşamaları

Çeltiğin toprak işlemden pirinç oluşan kadar geçen süreçteki üretim aşamaları ve üretim teknikleri aşağıdaki Çizelgede verilmiştir.

Çizelge 1. Çeltiğin Üretim Aşmaları

Aşama / Evre	Ana İşlemler / Gerekl Uygulamalar	Açıklama / Notlar
Tohum Hazırlığı/ Ön Çimlendirme	Tohumların suya konulması, fungusit uygulaması, çimlenme testi	Çimlenme ve fide döneminde ideal sıcaklık 18-35 °C olmalı.
Ekim / Ekim Yöntemi	Serpme (elle, uçaktan), Ekim Makinası ile, Fideleme (dikim)	Türkiye’de yaygın yöntem: tohumları suya dağıtma ya da fideleme yöntemi.
Su Yönetimi / Sulama	Tarlaların suyla kaplanması, su yüksekliğinin ayarlanması	Bitki gelişimine bağlı olarak su yüksekliği artırılır; maksimum gelişme devresinde ~15 cm civarında tutulabilir.

Gelişme / Vejetatif Dönem	Kardeşlenme, yaprak gelişimi, sürgün oluşumu	Verim unsurları bu dönemde şekillenir.
Başak Oluşumu / Reprodüktif Dönem	Başak teşekkülü, çiçeklenme, döllenme	Bu aşama kritik: çiçeklenme ve döllenme streslere duyarlıdır.
Olgunlaşma / Dane Dolumu	Dane beslenmesi, olgunlaşma süreci	Bu aşamada su kesme, su akışının durdurulması uygulanır.
Hasat / Biçim	Biçme, dane ayırma, kurutma	Hasattan önce su boşaltılır. Kurutma ile nem oranı ayarlanır.
İşleme (Pirinç Haline Getirme)	Kabuk ayırma, öğütme, temizlik, paketleme	Çeltiğin işlenmesi sonrası pirinç elde edilir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

İnsansız hava araçları, özellikle geniş arazilerde tarımda ekim, gübreleme, ilaçlama gibi işlemleri hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirebilir. Çeltik ekiminde, drone teknolojisi ile tohumların belirli bir hassasiyetle toprağa yerleştirilmesi sağlanabilir. Makine kullanımı, özellikle büyük arazilerde daha az iş gücüyle çok daha kısa sürede ekim yapılmasını sağlar. Bu, özellikle mevsimsel zamanlamaların önemli olduğu çeltik ekimi gibi ürünlerde büyük bir avantajdır. Maliyet etkinliği incelendiğinde makine kullanımının, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında başlangıç maliyetleri yüksek olsa da uzun vadede daha düşük iş gücü ve verimli kaynak kullanımı ile maliyetlerin düşmesi beklenmektedir. Bu konuda yapılan ekonomik analiz sonucunda daha yüksek verimle çalıştığı ve dolayısıyla daha düşük birim maliyetle sonuçlandığına dair bulgulara ulaşmayı hedefler. Drone ve makine kullanımı ile yapılan çeltik ekimi yatırımlarının geri dönüş süresi de analiz edilmelidir. Bu analiz, çiftçilerin bu teknolojilere ne kadar sürede uyum sağlayabileceklerini ve ekonomik açıdan avantaj sağlayıp sağlamadığını gösterecektir.

Bu çalışmanın amacı, serpme ekimin drone ve makine kullanımı ile bitkinin vejetatif ve generatif özellikleri ile yöntemlerin enerji tüketimlerinin karşılaştırılmasıdır. Çeltik ekimi süreçlerinin tarımsal verimliliği artırma, çevresel etkileri azaltma ve maliyetleri düşürme konusundaki etkilerini araştırmaktır. Geleneksel ekim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bu teknolojilerin sağladığı yenilikçi çözümler üzerinden, ekim sürecinin hızlandırılması, iş gücü gereksinimlerinin azaltılması ve doğal kaynakların daha verimli kullanılması hedeflenmektedir.

Araştırmada, tarımsal üretimde enerji verimliliğini artırma yönünden en uygun yöntemin belirlenmesi ve enerji girdilerinin rasyonel kullanımı açısından sistemlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL ve METOD

2.1.1. Materyal

Bu çalışma, Edirne ili Uzunköprü ilçesi, Kırçasalih köyünde çeltik tarımı yapılan bir çiftçi arazisinde yürütülmüştür. Araştırma sahası, bölgenin tipik alüvyal toprak yapısına sahip, yüzey drenajı iyi ve düzgün tesviyeli bir tarım alanıdır.

2.1.1 Araştırma Alanı ve Toprak Özellikleri

Uzunköprü yöresi ılıman bir iklime sahiptir ve yıllık yağış ortalaması yaklaşık 600–700 mm'dir. Deneme alanı deniz seviyesinden yaklaşık 20 m yükseklikte olup toprak yapısı ağır bünyeli alüvyal killi tondur. Ekimden önce yapılan toprak analizlerinde alanın pH değeri nötrün hafif altında (pH 6,5–6,8), organik madde içeriği ise orta düzeyde (%2–3) bulunmuştur. Bu özellikler doğrultusunda bölge, çeltik yetiştiriciliğine uygun nem tutma kapasitesi ve besin maddesi desteği sağlayan bir tarımsal ortam sunmaktadır. Denemede sulama, gübreleme ve yabancı ot mücadelesi gibi bakım uygulamaları her parselde aynı şekilde uygulanmış, böylece yalnızca çeltik çeşidi farklılığının değerlendirilmesi sağlanmıştır.

2.1.2 İklim Özellikleri

Edirne'nin güneydoğusunda yer alan Uzunköprü ilçesi, Marmara Bölgesi ile Trakya'nın geçiş kuşağı üzerinde bulunması nedeniyle geçiş iklimi özellikleri sergilemektedir. İlçede yıllık ortalama sıcaklık 14–15 °C civarında olup, yazlar genellikle sıcak ve kurak, kışlar ise soğuk ve zaman zaman don olaylarına açıktır. Temmuz ayı sıcaklık ortalığı 25–27 °C iken, ocak ayında 2–4 °C civarında değerler gözlenmektedir. Kar yağışı nadiren görülse de, yüksek bölgelerde kısa süreli kar örtüsü oluşabilmektedir. Uzunköprü'de yıllık toplam yağış miktarı 600–650 mm civarındadır ve bu yağışlar çoğunlukla sonbahar ve kış aylarına yoğunlaşmaktadır. Yaz aylarında yağış miktarı azalırken, nem oranı ortalama %70 düzeyindedir ve kış aylarında yüksek nem ile sisli günler tarımsal uygulamaları etkileyebilir. Bu iklim koşulları, çeltik üretimi açısından hem avantajlar hem de sınırlılıklar yaratmaktadır. Uzunköprü'nün sıcak ve uzun yaz dönemleri, çeltik bitkisinin vejetatif gelişimi ve suya duyarlı büyüme aşamaları için uygun bir ortam sağlarken, yaz kuraklığı ve yetersiz yağış sulama ihtiyacını artırmaktadır. Kış aylarında düşük sıcaklıklar ve don olayları ise özellikle fideleme ve erken büyüme dönemlerinde bitki gelişimini sınırlayabilmektedir. Buna karşın, ilçenin düz ve su tutma kapasitesi yüksek tarım alanları çeltik yetiştiriciliği için önemli avantajlar sunmaktadır. İklim ve hidrolojik koşulların uygunluğu, tarımsal planlamada sulama yönetimini öncelikli kılmakta ve suyun etkin kullanımıyla verimliliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, Uzunköprü'nün iklimi çeltik üretimi açısından genel olarak elverişli olmakla birlikte, yaz kuraklığı ve kış don riskleri üretim planlamasında dikkate alınması gereken temel sınırlılıkları oluşturmaktadır.

2.1.3 Çeltik

Denemede kullanılan bitki materyalini Cammeo çeltik çeşidi oluşturmuştur. Cammeo çeşidi uzun taneli, kaliteli ve yüksek verim potansiyeline sahip orta bir çeşittir. Bu çeşidin bölge koşullarına uygunluk ve verim performanslarının iyi olmasından seçilmiştir.

2.1.4 Denemede Kullanılan Alet ve Makinalar

Bu çalışmada tarımsal üretim süreçlerinde çeşitli makine ve ekipmanlar kullanılmıştır. Toprak hazırlığında Orhay marka ağır kültivatör ve Orhay marka hafif kültivatör kullanılarak arazi farklı

derinliklerde işlenmiştir. Arazi yüzeyinin düzgünleştirilmesi amacıyla İlgi marka lazer tesviye ekipmanı kullanılmıştır. Ekim işlemleri hem Irtem marka çift diskli, baskı tekerlekli mibzer ile hem de tarımsal amaçlı dron ile gerçekleştirilmiştir. Dron, ekim sırasında tohumların homojen dağılımı için kullanılmış olup, aynı zamanda bitki koruma uygulamalarında ilaçlamada da görev almıştır. Böylece çalışma boyunca dron, hem ekim hem de ilaçlama süreçlerinde etkin şekilde kullanılmıştır.

2.1.4.1 Üniuersal Ekim Makinası

Ekim öncesi toprak hazırlığı iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kültivatör kullanılarak yüzeysel ve derin toprak işleme yapılmış, ardından tesviye aşamasına geçilmiştir. Arazi tesviyesi, İlgi marka lazerli tesviye sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiş olup, bu işlem tarla yüzeyinin d zg nl  n  sağlayarak suyun homojen dağılmasına ve bitki çıkışlarının eşit olmasına katkı sağlamıştır.

Ekim işlemi, Irtem marka çift diskli baskı tekerlekli  niuersal ekim makinesi ile yapılmıştır. Söz konusu makine, farklı tohum türleri için ayarlanabilir sıra aralığı ve yüksek ekim hassasiyeti sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca mekanik ekim sistemi sayesinde  eltik tohumlarının düzgün ve homojen biçimde toprağa yerleştirilmesi sağlanmıştır.

2.1.4.2 Drone (İnsansız Hava Aracının)

Bu tez çalışmasında, tohum ekimi ve tarımsal uygulamalar için DJI Agras T40 modeli insansız hava aracı (İHA) kullanılmıştır. Araştırma kapsamında arazi koşullarında test edilen İHA, tarımsal tohum ve gübre serpmeye görevleri için tasarlanmış dört pervaneli bir sistemdir. Kullanılan drone, yüksek hassasiyetli GNSS sensörü ve geli mi  otomasyon sistemleri sayesinde ekim işlemlerini kısa sürede ve etkin bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. İlaçlama sıvı tankı ile birlikte maksimum kalkış ağırlığı 110 kg olan bu model, kompakt boyutları ve güçlü motor sistemi ile farklı tarım alanlarında güvenli ve verimli bir kullanım sunmaktadır. Denemede kullanılan insansız hava aracının teknik özellikleri  izelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2. İnsansız Hava Aracının Teknik Özellikleri

Kategori	Özellikler
Genel Bilgiler	Model: DJI Agras T40Tip: Dört pervaneli tarımsal İHAKullanım amacı: Tohum ve gübre serpmeye uygunKalkış ağırlığı: ~90 kg (bu çalışmada kullanılan: 50 kg)İlaçlama tankı ile kalkış: 110 kg
Boyutlar ve Yapı	Kanat ve pervane açıldığında: 2800 × 3150 × 780 mmStator ölçüsü: 100 × 33 mmMotor KV: 48 RPM/VMotor gücü: 4000 W / pervanePervane çapı: 54 inçPervane sayısı: 8
Uçuş Performans	Sürekli uçuş süresi (tam yük): 6 dk (@30.000 ve mAh, 101 kg)Maksimum rüzgar direnci: 6 m/sMaksimum uçuş yarıçapı: 2000 mEtkin menzil: 7 km
Navigasyon ve Konumlandırma	GNSS sensörü: gelişmiş seviyeRTK konumlandırma desteğiDesteklenen frekanslar: GPS L1/L2, GLONASS F1/F2, BeiDou B1/B2, Galileo E1/E5
Pompa ve Sprey Sistemi	Çift Atomize Sprey Sistemi ve Su PompasıManyetik tahrikli pervaneli pompaMaksimum akış hızı: 6 L/dakika × 2
Radar ve Sensörler	Aktif fazlı dizi omnidirectional radarArazi takibi ve engel algılamaBiyonik görüş sistemiGeri ve aşağı radarArka engel kaçınma hassasiyeti: 1,5 mKalkış/iniş/yükselme hızı: 7 m/s
İletişim ve Bağlantı	Wi-Fi: Wi-Fi 6, frekans 5,850 GHzBluetooth: 5.1, frekans 2,4835 GHz
Ekran ve Kullanıcı Arayüzü	Dokunmatik LCD ekran: 7,02 inçÇözünürlük: 1920 × 1200Parlaklık: 1200 cd/m ²
Çalışma ve Depolama Koşulları	Çalışma sıcaklığı: 20°C – 50°C (-4°F – 122°F)Depolama sıcaklığı: -30°C – 30°C (3 ay – 1 yıl)

2.1.4.3 Lazerli Tesviye Makinası

İlgi Tarım, lazerli toprak işleme ve tesviye makineleri konusunda Türkiye’de önde gelen markalardan biridir. Özellikle “Omega” serisi, hassas yüzey tesviyesi, su tasarrufu ve verimlilik artışı gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. İlgi Tarım Lazerli Tesviye Makinelerinden Omega Serisi makinasıdır. Omega Tesviye Makinesi, lazer ve GPS teknolojileriyle donatılmıştır. Teknik Özelliklerine bakıldığında İş Genişliği: 3,5 m ile 7,5 m, güç İhtiyacı: 85 HP ile 300 HP ve ağırlığı 2.420 kg olan Omega modeli kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

2.2.1 Ekim Yöntemleri

Serpme Ekim: Ekim öncesinde ön çimlendirmesi yapılmış tohumlar insanlar tarafından elle serpilerek ekim yapılmıştır.

Universal Ekim Makinesi Ekimi: Üniversal ekim makinası dekara 20 kg olacak şekilde kalibre edilerek ekim işlemi yapılmıştır.

Drone Ekimi: Tohum ekimi, DJI Agras T40 model insansız hava aracı (İHA) ile gerçekleştirilmiştir. Ekim öncesinde ön çimlendirmesi yapılmış tohumlar drone tankına her doldurulmuştur. Dekara Tohum çıkış debisi (çıkış hızı) her bir parselde aynı değerde sabitlenerek serpmeyi optimize edecek şekilde ayarlanmıştır. Uçuş öncesinde İHA’ya, GPS destekli otomatik rota planlaması yoluyla parsellerin koordinatları yüklenmiş ve her parsel için uçuş rotaları oluşturulmuştur. Uçuş parametreleri standartlaştırılmış; uçuş yüksekliği 3 m, uçuş hızı 6–8 m/s ve serpme genişliği yaklaşık 5–6 m olarak sabit tutulmuştur.

Drone, belirlenen rotalar boyunca paralel hatlar halinde sabit hız ve yükseklikte hareket ederek tohumları eşit aralıklarla parseller üzerine serpmiştir. Uygulama sırasında rüzgar hızı düşük tutulmuş, parsel yüzeyi ise tohum serpmeye uygun nemli toprak koşullarında tutulmuştur. Ekim işlemi tamamlandıktan sonra parseller su ile kaplanarak (sulama işlemi ile) tohumların çimlenmesi için gerekli nem koşulları sağlanmıştır.

2.2.2 Bitki Özellikleri ile İlgili Ölçümler

Başaktaki Tane Sayısı: Her parselde hasat olgunluğuna gelen bitkilerden tesadüfi olarak seçilecek 10 bitkinin salkımındaki taneler sayılmış ve ortalaması alınarak adet olarak belirlenmiştir (Günerdi, 2021).

Dolu Tane Sayısı: Her parselde hasat olgunluğuna gelen bitkilerden tesadüfi olarak seçilecek 10 bitkinin salkımındaki taneler sayılmış ve ortalaması alınarak adet olarak belirlenmiştir (Günerdi, 2021).

Boş Tane Sayısı: Her parselde hasat olgunluğuna gelen bitkilerden tesadüfi olarak seçilecek 10 bitkinin salkımındaki boş taneler sayılmış ve ortalaması alınarak adet olarak belirlenmiştir (Günerdi, 2021).

Başak Uzunluğu: Her parselden rasgele seçilen 40 bitkinin ana sapındaki başaklar ölçülüp ortalaması alınmış başak boyu mm olarak bulunmuştur (Günerdi, 2021).

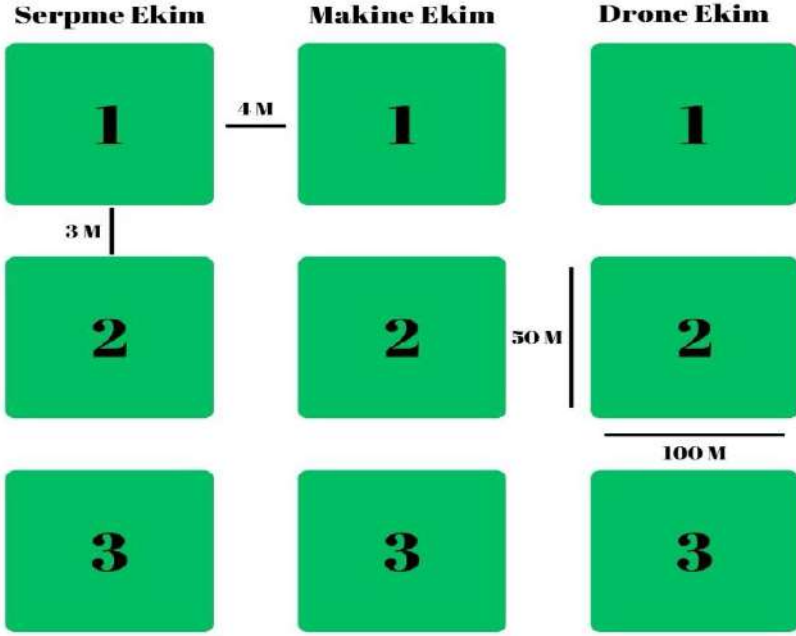
Bitki Boyu: Her parselde hasat olgunluğuna gelen bitkilerden tesadüfi olarak seçilen 10 bitkinin toprak seviyesi ile salkımın en uç başakçığı (kılçık hariç) arasında kalan mesafe ölçülmüş ve cm olarak belirlenmiştir (Fielke ve Bayhan 2011).

Salkımdaki Tane Ağırlığı: Her parselde hasat olgunluğuna gelen bitkilerden tesadüfi olarak seçilen 10 bitkinin salkımındaki taneler tartılmış ve ortalaması alınarak g olarak belirlenmiştir (Günerdi, 2021).

2.2.3 Deneme Deseni ve İstatistiki Analiz

Araştırmada elde edilen bulgular SPSS paket programı kullanılarak sonuçlar arasındaki farkın olup olmadığı tespit edilerek önemli bulunan parametreler istatistiki olarak karşılaştırılmış ve varyans analizleri (ANOVA) SPSS (Version 12.00; Chicago, IL, USA) istatistik yazılımı programında yapılmıştır.

Tarla denemeleri tesadüf parsellerine göre üç tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Ekim yöntemlerinden kaynaklanan önemli farklılıklar olup olmadığı Tukey testi ($p \leq 0,05$) yapılarak tespit edilmiştir (Düzgüneş vd., 1987). Araştırma alanındaki parsellerin ölçüleri ve genel görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Ekim Yöntemlerinin Tesadüf Parsellere Göre Dağılımı

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1 Başaktaki Dane Sayısı

Uygulanan ekim sistemlerinin başaktaki tane sayılarının varyans analizi sonucunda ekim sistemleri açısından aralarındaki fark istatistiki olarak önemsiz bulunmuş olup ($F=3,338^{ns}$) sonuçlar Çizelge 3’de verilmiştir. Ekim sistemlerinden universal ekim makinası ile ekimde en fazla 57,93 dane, dron ile ekimde 52,13 dane ve en az serpme ekimde ise 48,30 dane saptanmıştır (Çizelge 4). Başaktaki dane sayısı incelendiğinde makine ile ekim yapıldığından dolayı sıralar arası eşit ve sıra üzeri düzgün olduğundan bitkinin optimum yaşam alanı eşit olduğundan diğer ekim sistemlerinde ise serpme olarak tohum atıldığından dolayı bitkinin yaşam alanı eşit olmamasından kaynaklandığı gözlenmiştir. Önal, İ. (2003), yılında yaptıkları bir çalışmada makine ile ekimin üstünlükleri belirtilmiş olup, serpme ekime göre bitkinin optimum yaşam alanının daha eşit olduğunu vurgulamıştır.

Çizelge 3. Başaktaki tane sayısına ilişkin varyans analiz tablosu

Değişim Kaynakları	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F	P
Gruplar arası	2	141,136	70,568	3,3,38 ⁿ _s	0,106
Gruplar içi	6	126,833	21,139		
Toplam	8	267,969			

Çizelge 4. Başaktaki tane sayısına ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ekim Sistemleri	Ort+SS	S-Hata	Min	Max	P
Serpme ekim	48,30 ^a ± 4,95	2,8618	45,0	54,0	
Makine ile ekim	57,93 ^a ± 2,70	1,5603	55,9	61,0	
Dron ile ekim	52,13 ^a ± 5,61	3,2426	45,9	56,8	
Total	52,78 ± 5,78	1,9292	45,0	61,0	

* Aynı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistik olarak önemsizdir.

3.2 Dolu Çeltik Sayısı

Ekim sistemlerinin dolu çeltik sayısı üzerine yapılan varyans analizinde dolu çeltik sayılarının önemli olduğu tespit edilmiştir (F=5,984*) (Çizelge 5). En düşük dolu çeltik sayısı serpme ekimde 42,63, dron ile ekimde 46,57 ve makine ile ekimde ise 52,75 olarak bulunmuş olup sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir. Makine ile ekimde başaklardaki dolu çeltik sayısının fazla olması sıra ekim yapılmasından kaynaklandığı gözlenmiştir. Çünkü bitkilerin optimum yaşam alanının eşit olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5. Dolu çeltik sayısına ilişkin varyans analiz tablosu

Değişim Kaynakları	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F	P
Gruplar arası	2	155,509	77,754	5,984*	0,037
Gruplar içi	6	77,960	12,993		
Toplam	8	233,469			

Çizelge 6. Dolu çeltik sayısına ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ekim Sistemleri	Ort $\pm$ SS	S-Hata	Min	Max	P
Serpme ekim	42,63 ^a $\pm$ 4,05	2,3383	39,0	47,0	
Makine ile ekim	52,73 ^a $\pm$ 0,80	0,4667	52,0	53,6	
Dron ile ekim	46,56 ^{ab} $\pm$ 4,68	2,7033	41,6	50,9	
Total	47,31 $\pm$ 5,40	1,8007	39,0	53,6	

* Aynı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistik olarak önemsizdir.

3.3 Boş Çeltik Sayısı

Yapılan varyans analizi sonucunda boş çeltik sayısının istatistiki fark önemsiz belirlenmiş ve varyans analiz sonuçları Çizelge 7’de görülmektedir (F=2,058^{ns}). Araştırmada elde edilen dolu çeltik

sayılarının tanımlayıcı istatistikleri Çizelge 8’de verilmiştir. Ekim sistemlerinin boş çeltik sayısı üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 7. Boş çeltik sayısına ilişkin varyans analiz tablosu

Değişim Kaynakları	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F	P
Gruplar arası	2	4,116	2,058	2,303 ^{ns}	0,181
Gruplar içi	6	5,360	0,893		
Toplam	8	9,476			

Çizelge 8. Boş çeltik sayısına ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ekim Sistemleri	Ort+SS	S-Hata	Min	Max	P
Serpme ekim	5,63 ^a ± 0,66	0,3844	5,2	6,4	
Makine ile ekim	4,16 ^a ± 1,30	0,7513	2,9	5,5	
Dron ile ekim	5,56 ^a ± 0,73	0,4256	5,0	6,4	
Total	5,12 ± 1,08	0,3628	2,9	6,4	

* Aynı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistik olarak önemsizdir.

3.4 Bitki Boyu

Ekim sistemlerinin çeltik bitkisinin boyu değerleri varyans analizine tutulduğunda elde edilen sonuçlara göre ekim sistemleri arasındaki fark önemli olmuştur (F=11,561**) (Çizelge 9). En düşük bitki boyu serpmek ekimde 68,13 cm, ekimde 71,00 cm ve dron ile ve makinede ise ekimde ise 74,30 cm elde edilmiştir (Çizelge 10 ve Şekil 2).

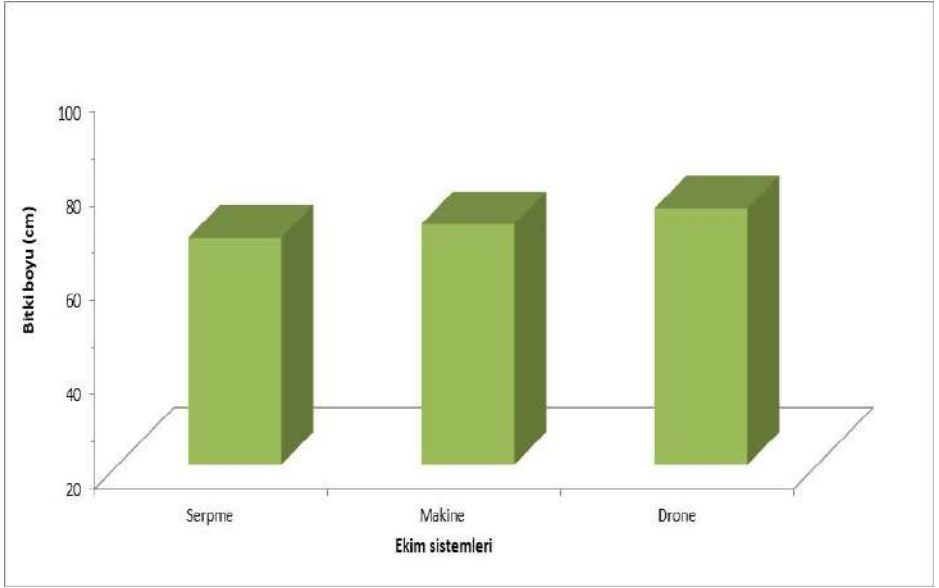
Çizelge 9. Bitki boyuna ilişkin varyans analiz tablosu

Değişim Kaynakları	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F	P
Gruplar arası	2	57,136	28,568	11,561*	0,009
Gruplar içi	6	14,827	2,471		
Toplam	8	71,962			

Çizelge 10. Bitki boyuna ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ekim Sistemleri	Ort±SS	S-Hata	Min	Max	P
Serpme ekim	68,13 ^a ± 2,51	1,4518	65,3	70,1	
Makine ile ekim	71,00 ^{ab} ± 1,00	0,5774	70,0	72,0	
Dron ile ekim	74,30 ^b ± 0,30	0,1732	74,0	74,6	
Total	71,14 ± 2,99	0,9997	65,3	74,6	

* Aynı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistik olarak önemsizdir



Şekil 2. Ekim sistemlerinin bitki boyu üzerindeki etkisi

3.5 Başak Uzunluğu

Yapılan varyans analizi sonucunda başak uzunluğu ekim sistemleri üzerine etkisi önemli bulunmuş varyans analiz sonuçları Çizelge 11’de görülmektedir ($F=27,858^{**}$). Araştırmada elde edilen başak uzunluğunun tanımlayıcı istatistikleri Çizelge 12’de verilmiştir. Ekim sistemlerinin başak uzunluğu üzerinde etkili olduğu ve bununda verime etkisinin olduğu görülmüştür. Ekim sistemlerinin başak uzunluğunun üzerindeki etkisi Şekil 3’te verilmiştir.

Çizelge 11. Başak uzunluğuna ilişkin varyans analiz tablosu

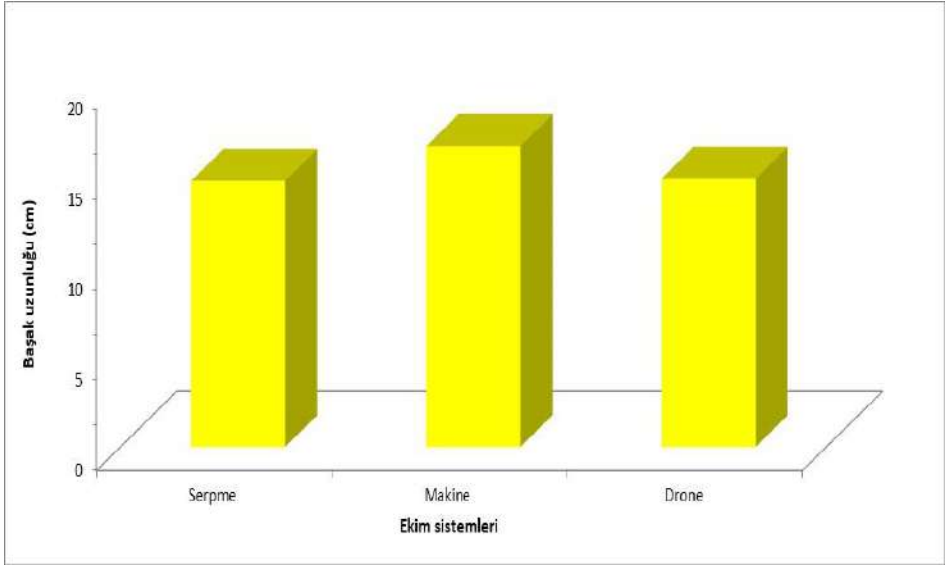
Değişim Kaynakları	Serbestli k Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması F_1 (KO)	F	P

Gruplar arası	2	6,996	3,498	27,858* *	0,001
Gruplar içi	6	0,753	0,126		
Toplam	8	7,749			

Çizelge 12. Başak uzunluğuna ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ekim Sistemleri	Ort±SS	S-Hata	Min	Max	P
Serpme ekim	14,70 ^a ± 0,36	0,2082	14,4	15,1	
Makine ile ekim	16,63 ^b ± 0,32	0,1856	16,4	17,0	
Dron ile ekim	14,83 ^a ± 0,37	0,2186	14,4	15,1	
Total	15,38 ± 0,98	0,3281	14,4	17,0	

* Aynı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistik olarak önemsizdir



Şekil 3. Ekim sistemlerinin başak uzunluğu üzerindeki etkisi

3.6 Salkımdaki Dane Ağırlığı

Uygulanan ekim sistemlerinin salkımdaki dane ağırlığının değerleri varyans analize tabi tutulduğunda ekim sistemleri açısından aralarındaki fark istatistiki olarak önemsiz bulunmuş olup ($F=1,36^{ns}$) sonuçlar Çizelge 13’de verilmiştir. Ekim sistemlerinden üniversal ekim makinası ile ekimde en fazla 1,86 g dane, dron ile ekimde 1,76 g ve en az serpme ekimde ise 1,53 g belirlenmiştir (Çizelge 14).

Çizelge 13. Salkımdaki dane ağırlığına ilişkin varyans analiz tablosu

Değişim Kaynakları	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F	P
Gruplar arası	2	0,176	0,088	1,386 ^{ns}	0,320
Gruplar içi	6	0,380	0,063		
Toplam	8	0,556			

Çizelge 14. Salkımdaki dane ağırlığına ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ekim Sistemleri	Ort $\pm$ SS	S-Hata	Min	Max	P
Serpme ekim	1,53 ^a $\pm$ 0,23	0,1333	1,4	1,8	
Makine ile ekim	1,86 ^a $\pm$ 0,20	0,1202	1,7	2,1	
Dron ile ekim	1,76 ^a $\pm$ 0,30	0,1764	1,5	2,1	
Total	1,72 $\pm$ 0,26	0,0878	1,4	2,1	

* Aynı harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistik olarak önemsizdir

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Uygulanan ekim sistemlerinin başaktaki tane sayıları, boş çeltik sayısı ve salkımdaki dane ağırlığı üzerine etkisi istatistiki olarak önemsiz bulunmuştur. Ekim sistemleri yapılan varyans analizi sonunda dolu çeltik sayısı, bitki boyu ve başak uzunluğu arasındaki fark istatistiki olarak önemli bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde makine ile ekimin serpme ekim ile drone ekime göre üstünlük sağladığı gözlenmiştir. Bunun nedeni makine ile ekim yapıldığından dolayı sıralar arası eşit ve sıra üzeri düzgün olduğundan bitkinin optimum yaşam alanının diğer ekim sistemlerine göre eşit olmasından kaynaklanmaktadır.

Çeltiğin ekim makinaları ile ekilmesinin serpme ekime göre daha iyi sonuçlar verdiği, yabancı ot mücadelesi ve diğer ilaçlamaların daha kolay ve verimli yapıldığından tercih edilebilecek bir yöntem olduğunu saptanmıştır. Bölgede makine ile ekim her geçen gün artmakta olup tercih edilecek bir yöntemdir.

KAYNAKÇA

- Anonim, (2024). Cost analysis of drone and mechanical rice planting methods. *Indonesian Agricultural Research Review*, 11(4), 55–68.
- Anonim, (2025). Satellite and AI-based monitoring of rice crop density after drone seeding. *Frontiers in Sustainable Agriculture*, 2(1), 12–22.
- Azizul, M., Rahman, A., & Zulkifli, N. (2023). Factors affecting farmer adoption of drones in Malaysian rice farming. *Journal of Agricultural Technology Studies*, 15(2), 88–102.
- Başer, N., & Gençtan, T. (1996). Farklı ekim yöntemlerinin çeltik çeşitlerinde verim üzerine etkileri. Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü Yayınları.
- Chen, X., & Li, Y. (2025). Development of AI-based drone control software for optimizing rice seed distribution. *China Agricultural Science Journal*.
- Çiçek, G., & Sümer, H. (2009). Çeltik ekiminde santrifüj ekim makinesinin performans analizi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 5(1), 45–53.
- Düzgüneş, O. Kesici, T. ve Gürbüz, F. (1987). *İstatistik metodları-1*. Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Yayın No:861, Ders Kitabı:229, Ankara.
- Esgici, O., & Özcan, H. (2012). Biçerdöverle hasatta dane kayıplarının belirlenmesi ve etkileyen parametrelerin incelenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 18(3), 45–53.

- Fielke, J., & Bayhan, Y. (2011). Effect of set up parameters for a dual tine and presswheel seeding module on seed placement and germination. *Tarım Makinaları Dergisi*, 7(2), 191–197.
- Günerdi, A. D. (2021). *IMI grubu ve konvansiyonel çeltik (Oryza sativa L.) çeşitlerinin verim ve kalite özellikleri bakımından karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye).
- Hacıoğlu, H. (2023). Çeltik üretiminde enerji kullanım verimliliği: Çorum–Osmancık örneği. *Tarım Ekonomisi ve Enerji Araştırmaları Dergisi*, 12(4), 210–225.
- Kawamura, T., Sato, K., & Nakamura, H. (2022). Effects of drone-based rice planting on irrigation efficiency in Japan. *Journal of Japanese Agriculture*, 45(2), 101–113.
- Nguyen, P., Tran, H., & Le, T. (2025). Influence of drone flight parameters on seed distribution in rice fields in Vietnam. *Vietnamese Journal of Agricultural Science*, 33(1), 23–36.
- Önal, İ. (1995). Ekim bakım ve gübreleme makinaları. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, No: 490, s:52-65, İzmir.
- Sezer, İ., Kaya, A., & Demir, M. (2017). Çeltikte makineli fideleme ve serpmeye ekimin karşılaştırılması. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Tarla Bitkileri Araştırmaları Bülteni*.
- Singh, R., & Patel, S. (2023). Comparative study of mechanical and drone rice planting in India: Yield and terrain adaptability. *Indian Journal of Crop Science*, 40(3), 77–88.

- Şavşatlı, S., & Gülümser, A. (2005). Çeltik ekim yöntemlerinin verim ve kalite üzerine etkisi. Samsun Tarımsal Araştırma Enstitüsü Yayını.
- Varsa, E. C., Chong, S. K., Abolaji, J. O., Farquhar, D. A., & Olsen, F. J. (1997). Derin toprak işleme uygulamalarının toprak fiziksel özellikleri ve mısır (*Zea mays* L.) kök gelişimi ile üretimi üzerine etkisi. *Soil and Tillage Research*, 43, 219–228.
- Wang, J., & Chen, L. (2024). Comparison of mechanical direct-seeding and drone-based systems for rice cultivation. *Asian Journal of Agricultural Technology*, 29(2), 88–97.
- Zhang, Y., Li, M., & Zhou, Q. (2023). Optimization of autonomous drone parameters for rice direct seeding. *Journal of Field Robotics*, 40(5), 512–526.

TARIMDA TEKNOLOJİ VE ENERJİ YÖNETİMİ

