

TARIMSAL ÜRETİMDE ENERJİ VE MEKANİZASYON ARAŞTIRMALARI



———— Editörler: ————

Prof. Dr. Mehmet Fırat BARAN
Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY



ISBN: 978-625-5753-34-2

Ankara- 2025

TARIMSAL ÜRETİMDE ENERJİ VE MEKANİZASYON ARAŞTIRMALARI

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. Türkan AKTAŞ¹

Prof. Dr. İbrahim YALÇIN²

Prof. Dr. Cengiz KARACA³

Prof. Dr. Can ERTEKİN⁴

Prof. Dr. Refik POLAT⁵

Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN⁶

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK⁷

Prof. Dr. Ahmet Kamil BAYHAN⁸

Doç Dr. Ali TEKGÜLER⁹

Doç. Dr. Nuri ÇAĞLAYAN¹⁰

Dr. Öğr. Üyesi Ümran ATAY¹¹

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir AYANOĞLU¹²

Dr. Öğr. Üyesi Orhan ARPA¹³

Arş. Gör. Dr. Tuğba KARAKÖSE¹⁴

Dr. Tuncay TOPDEMİR¹⁵

Arş. Gör. Hasan Berk ÖZYURT¹⁶

Öğr. Gör. Merve SAYTAŞ¹⁷

Hasan Cem BİLİM¹⁸

Mehmet Efnan KOYUNLU¹⁹

Doç. Dr. Nusret MUTLU²⁰

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM²¹

¹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem
Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye
taktas@nku.edu.tr
ORCID ID: 0000-0001-9977-859X

²Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem
Mühendisliği Bölümü, Tarımsal Makine Sistemleri Anabilim Dalı
Aydın-Türkiye
iyalcin@adu.edu.tr
ORCID ID: 0000-0002-5599-7384

³Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem
Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye
ckaraca@mku.edu.tr
ORCID ID: 0000-0001-5161-1512

⁴Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve
Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye
ertekin@akdeniz.edu.tr

⁵Kırgızistan Türkiye Manas Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe-Tarla
Bitkileri Bölümü (Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü, refik.polat@selcuk.edu.tr)
refik.polat@manas.edu.kg
ORCID ID: 0009-0006-3222-5353

⁶Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem
Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye
icelen@nku.edu.tr

⁷Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve
Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye
hhozturk@cu.edu.tr
ORCID ID: 0000-0001-6904-5539

⁸Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi,
Tarım Makinelere ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta-
Türkiye
kamilbayhan@isparta.edu.tr

ORCID ID: 0000-0001-6573-9867

⁹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Tarım Makinaları Programı, Samsun-Türkiye

atekgul@omu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-0273-5014

¹⁰Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

nuricaglayan@akdeniz.edu.tr

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

umranatay@artuklu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-2248-4582

¹²Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Mardin-Türkiye

ayanoglu@artuklu.edu.tr

ORCID ID: 0009-0001-2392-7015

¹³Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21000, Diyarbakır, Türkiye

ORCID ID: 0000-0001-8129-1548

¹⁴Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Samsun –Türkiye

tugba.karakose@omu.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-1725-7027

¹⁵T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Uluslararası Tarımsal Araştırma ve Eğitim Merkezi İzmir, Türkiye

tuncay.topdemir@tarimorman.gov.tr

¹⁶Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye

berkozyurt@nku.edu.tr

ORCID ID: 0000-0003-0775-1723

¹⁷İstanbul Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Su ve Atık Yönetimi Teknikerliği Pr., İstanbul, Türkiye

mervesaytas@beykent.edu.tr

ORCID ID: 0000-0003-2951-2176

¹⁸Antepfıstığı Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, 27010, Gaziantep, Türkiye

cembilim@hotmail.com

ORCID ID: 0000-0002-2013-3762

¹⁹Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye

efnankynl@gmail.com

²⁰TC. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı GAP Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı, Şanlıurfa, Türkiye

nmutlu@gap.gov.tr

ORCID ID: 0000-0002-5780-4152

²¹Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Iğdır, Türkiye

kaan.kucukerdem@igdir.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-1593-4725

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17924144>



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: 978-625-5753-34-2

December / 2025

Ankara / Turkey

ÖNSÖZ

Tarımsal Üretimde Enerji ve Mekanizasyon Araştırmaları adlı bu eser, modern tarımın temel yapı taşlarını oluşturan enerji yönetimi, mekanizasyon düzeyi ve teknolojik yeniliklerin üretim süreçlerine etkisini kapsamlı biçimde ele alan bilimsel çalışmaları bir araya getirmektedir. Günümüz koşullarında artan nüfus, değişen iklim dinamikleri ve sınırlı doğal kaynaklar; tarımsal üretimde verimliliği artırırken aynı zamanda sürdürülebilirliği sağlamayı zorunlu hâle getirmektedir. Bu zorunluluk, tarımsal mekanizasyonun etkin kullanımını ve enerji tüketiminin bilimsel temellere dayalı olarak yönetilmesini her zamankinden daha önemli kılmaktadır.

Kitapta yer alan bildiriler ve araştırmalar; hasat ve işleme teknolojileri, kök bölgesi sıcaklık yönetimi, çimlenme süreçlerinin iyileştirilmesi, makine performans analizleri ve enerji optimizasyonu gibi geniş bir yelpazede güncel bilgi sunmaktadır. Her bir çalışma, üretim süreçlerinde karşılaşılan teknik sorunlara çözüm üretmeyi hedeflerken aynı zamanda yenilikçi yöntemlerin sahadaki uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Bu yönüyle eser, hem bilimsel literatüre katkı sağlamakta hem de üreticiler, araştırmacılar ve sektör paydaşları için pratik bir rehber niteliği taşımaktadır.

Tarımda mekanizasyon düzeyinin doğru belirlenmesi, enerji verimliliğine yönelik stratejilerin geliştirilmesi ve teknolojinin üretime entegrasyonunun bilimsel verilerle desteklenmesi; geleceğin tarım politikalarının şekillenmesinde kritik bir role sahiptir. Bu kitap, söz konusu alanlarda yürütülen araştırmaların güncel sonuçlarını ortaya

koyarak, ülkemizin ve dünyanın tarımsal üretim vizyonuna değerli katkılar sunmaktadır.

Bu eserin hazırlanmasında emeği geçen tüm araştırmacılara, destek veren kurumlara ve katkı sağlayan tüm paydaşlara içtenlikle teşekkür eder; çalışmanın tarımda enerji ve mekanizasyon odaklı araştırmalara yeni ufuklar açmasını temenni ederim.

15.12.2025

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Mehmet Fırat BARAN

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....7

İÇİNDEKİLER.....9

BÖLÜM 1:

BİYOĞAZ TESİSLERİNDE TARIMSAL ARTIKLARIN KÖPÜRME
PROBLEMİNE ETKİLERİ NEDENLERİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ
.....12-46

Merve SAYTAŞ

Türkan AKTAŞ

BÖLÜM 2:

AĞIR BÜNYELİ TOPRAKLARDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
.....47-64

Tuğba KARAKÖSE

Ali TEKGÜLER

BÖLÜM 3:

ANTEPFISTIĞI (PİSTACİA VERA L.) BAHÇELERİNDE TOPRAK
İŞLEME YÖNTEMLERİ: UYGULAMALAR, ETKİLER VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMLARI.....65-88

Hasan Cem BİLİM

Ümran ATAY

Refik POLAT

BÖLÜM 4:

BAĞLARDA ZİRAİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (ZİHA) İLE
YAPILAN PESTİSİT UYGULAMALARINDA FARKLI ZİHA VE
UYGULAMA PARAMETRELERİNİN DAMLA DAĞILIMINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ.....89-107

Hasan Berk ÖZYURT

İlker Hüseyin ÇELEN

Mehmet Efnan KOYUNLU

BÖLÜM 5:

SERA KAZANLARINDA KULLANILAN ASFALTİNİN
KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN GC-MS ANALİZİ.....108-121

Abdulkadir AYANOĞLU

Orhan ARPA

BÖLÜM 6:

BİYOGAZ ÜRETİMİ VE KULLANIMINDA
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK.....122-147

Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

Ümran ATAY

BÖLÜM 7:

TOPRAK İŞLEME YÖNTEMLERİNİN
CO₂ EMİSYON FAKTÖRÜ.....148-198

Tuncay TOPDEMİR

İbrahim YALÇIN

BÖLÜM 8:

MARDİN İLİNDE TARIMSAL ARTIKLARINDAN ENERJİ
ÜRETİM POTANSİYELİ.....199-211

Cengiz KARACA

BÖLÜM 9:

BİR SERA UYGULAMASINDA ŞEBEKE BAĞLANTILI VE
BAĞIMSIZ HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ.....212-251

Nuri ÇAĞLAYAN

Can ERTEKİN

BÖLÜM 10:

ISUBU TARIM MAKİNELERİ VE TEKNOLOJİLERİ
MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ ÖĞRENCİLERİNİN YILLARA GÖRE
DEMOGRAFİK YAPISININ İNCELENMESİ
.....252-272

Ahmet Kamil BAYHAN

BÖLÜM 11:

TARIM İŞLETMELERİNDE RÜZGÂR VE GÜNEŞTEN ELEKTRİK
ÜRETİMİ İÇİN YATIRIM VE İŞLETME GİDERLERİNİN
BELİRLENMESİ.....273-290

Nusret MUTLU

Ümran ATAY

Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

BÖLÜM 12:

TARIM İŞLETMELERİ İÇİN RÜZGAR VE GÜNEŞTEN BİRLİKTE
ELEKTRİK ÜRETİMİNİN ÖLÇEKLENDİRİLMESİ.....291-311

Nusret MUTLU

Ümran ATAY

Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

BÖLÜM 1

BİYOGAZ TESİSLERİNDE TARIMSAL ARTIKLARIN KÖPÜRME PROBLEMİNE ETKİLERİ NEDENLERİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ¹

Öğr. Gör. Merve SAYTAŞ

Prof. Dr. Türkan AKTAŞ*

GİRİŞ

Küresel enerji arz güvenliği ve iklim değişikliği ile mücadele, çağımızın öncelikli küresel sorunlarının başında yer almaktadır. Türkiye gibi enerji ihtiyacının önemli bir kısmını ithal fosil kaynaklarla karşılayan ülkeler için, fosil kaynaklara olan bağımlılığın yol açtığı riskler, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu sebeple, enerji çeşitlendirmesini sağlamak ve dışa bağımlılığı azaltmak için yerel ve yenilenebilir kaynakların kullanımının önemi her geçen gün daha fazla anlaşılmaktadır.

Sürdürülebilir biyogaz projelerinin yaygınlaştırılması, yalnızca enerji politikaları için değil, aynı zamanda Birleşmiş Milletler'in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na (SKA) ulaşma yolundaki küresel çabalar için de kritik bir adımdır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Biyoenerji çalışmaları, biyogaz teknolojilerinin başta Amaç 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), Amaç 13 (İklim Eylemi) ve Amaç 12 (Sorumlu Üretim ve Tüketim) olmak üzere, en az 10 farklı SKA'nın hedeflerine doğrudan katkı sağladığını ortaya koymaktadır (IEA Bioenergy, 2021). Bu çok yönlü katkı, biyogazı sürdürülebilir kalkınmanın hedeflerini aynı anda ele alabilen nadir çözümlerden biri haline getirmektedir.

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

Biyogaz, organik atıkların anaerobik koşullarda fermentasyonu sonucu elde edilen %40-70 metan, %30-60 karbondioksit, %0-3 hidrojen sülfür ve eser miktarda azot ve hidrojen içeren bir gazdır (Gizlenici vd., 2008). Organik atıklardan biyometanizasyon yoluyla biyogaz eldesi hem çevresel hem de ekonomik kazanç sağlanan bir bertaraf yöntemi olmaktadır. Biyometanizasyon ile düzenli depolanıp yeterli ve verimli bir şekilde geri kazanım sağlanamayan organik atıklardan biyogaz üretimi ve organik gübre elde edilebilmesi, enerji değerinin yanı sıra tarımsal ve kentsel atıklardan kaynaklanan metan emisyonunun azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu birçok ülke biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimini desteklemekte ve üretilen elektrik enerjisine alım garantisi vermektedir.

Tükenmez nitelikte olmaları, doğa dostu sayılmaları ve yerli kaynak olması gibi birçok faydası bulunmasına karşın biyogaz tesislerinin etkin bir şekilde işletilebilmesi için biyogaz üretiminin tüm aşamalarındaki sorunların tespiti önemli bir konu haline gelmektedir. Özellikle; uygun olmayan sistem dizaynları, işletme sırasında karşılaşılan problemler, hammadde yetersizliği gibi sorunlardan dolayı elektrik veya ısı üretiminin durması gibi olumsuzluklar biyogaz tesislerinde sık sık görülmektedir.

Biyogaz tesislerinin en önemli sorunlarından biri de köpük oluşumu ve buna bağlı işletme sorunlarının oluşmasıdır. Sık köpürme, biyogaz üretimini ve verimini düşürerek çürütücünün çalışma hacminde azalmaya neden olur ve önemli ekonomik kayıplara yol açabilir. Dahası, köpürme sonucu karıştırma cihazları ve/veya gaz çıkış boruları tıkanabilir, bu da çürütücülerde substratların ve mikroorganizmaların heterojen bir şekilde dağılmasına neden olur. Bu da biyogaz çamurunun taşması ve çürütücü patlamaları gibi çevre ve güvenlik risklerinin yanı sıra çalışma zorluğunu artırır (Tyagi vd., 2018; Wang vd., 2018; Kong vd., 2019).

Köpürme problemi Dünya çapında biyogaz tesislerinde tekrarlayan bir sorun olmasına rağmen, anaerobik sindirimde köpük oluşumunu önleme ve azaltma ve dolayısıyla bu sistemlerdeki biyogaz üretimindeki kayıpları azaltma olanaklarını araştıran bilimsel literatürde belirgin bir boşluk bulunmaktadır. Türkiye'deki tesislerde de

köpürmenin sahaya özgü nedenleri ve çözüm stratejileri üzerine sistematik çalışmalar da oldukça sınırlıdır.

Bu çalışma ile biyogaz tesislerinde sıkça karşılaşılan köpürme probleminin nedenlerini, etkilerini ve çözüm yaklaşımlarını işletme mühendislerinin görüşleri doğrultusunda değerlendirmek hedeflenmiştir. Türkiye genelinde faaliyet gösteren ve hammadde olarak tarımsal atık, gıda atığı ve/veya evsel organik atık ile beslenmekte olan tarımsal atık kullanan 34 biyogaz tesisinde görev yapan saha mühendisleri ile yapılan anket çalışmasının sonuçları değerlendirilerek; köpürme problemi derinlemesine incelenmesi, sektör profesyonellerinin deneyimlerine dayalı nitel bulgular ile köpük oluşumunu tetikleyen koşulların ve özellikle tarımsal atıkların rolünün ortaya koyulması; mevcut çözüm yöntemleri ve operasyonel zorlukların analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu veriler göz önüne alınarak sektör için uygulanabilir ve pratik çözüm önerileri sunulmuştur.

1. Biyogaz Tesislerinde Köpüklenme

Anaerobik sindirimde köpük oluşumu, birçok tam ölçekli biyogaz tesisinde zaman zaman kaydedilen ciddi bir sorundur. Köpük, %90'dan fazla gaz içeren bir gaz-sıvı dispersiyondur ve tipik olarak ana biyogaz çürütücüsünde veya ön depolama tankında, koyu kahverengi bir tabaka olarak oluşan yaygın bir işletme sorunudur (Oerther vd., 2001; Varley vd., 2004; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2010; Kougias vd. 2014).

Genel olarak, anaerobik çürütücü köpüğü çok sayıda katı parçacık içerir ve 0,7 ila 0,95 arasında özgül ağırlığa sahiptir. Ancak, bir köpürme probleminin oluşup oluşmayacağı, köpüğün türüne ve anaerobik çürütücüdeki operasyonel koşullara bağlıdır (Arya vd., 2022). Köpük oluşumunu destekleyen maddeler gibi, köpüğü stabilize eden maddeler de besleme işlemi sırasında biyogaz çürütücüsüne girer (Moeller vd., 2012a).

Köpük, biyogaz tesisi işletmecileri için; boru tıkanmasına, etkin çürütücü hacminde azalmaya, gaz borusu hatlarının tıkanmasına, kararsız metan üretimine, köpük oluşumu sırasında dolum seviyesini düşürmek için artan pompa ihtiyacına ve en kötü durumda çürütücü

çatısının zarar görmesine kadar birçok soruna neden olabilir. Köpük oluşumu nedeniyle gelir kaybı, fazla mesai ve bakım masrafları gibi nedenlerle operasyonel giderler de artmaktadır (Barjenbruch vd. 2000; Barber, 2005; He vd., 2017).

Tesis yönetiminde hatalar, örneğin aşırı besleme oranları, uygunsuz karıştırma, küf ve mikotoksin içeren bozulmuş silaj benzeri hammaddelerin kullanımı, çürütücüdeki sıcaklık veya pH dalgalanmaları aşırı köpüklenmeye yol açabilir (Moeller vd., 2013). Köpürme oluşumunun tam ölçekli biyogaz çürütücülerinde biyogaz üretiminde %20–50 kayba yol açtığını bilinmektedir, bazı durumlarda ise bu oran %90'lara kadar biyogaz kaybı ve toplam süreç başarısızlığını ortaya çıkarabilir (Yang vd., 2021, Kougias vd. 2014).

Almanya'nın Baviera bölgesinde bir biyogaz tesisi işletmecisi, tesisinde her bir köpük olayı için iş gücü artışı, gerekli köpük kırıcıların temini nedenleriyle maliyetinin arttığını; başka bir biyogaz tesisi işletmecisi ise, tesisindeki bir köpük kazasının büyük bir zarara sebep olmasından dolayı maliyetinin 500.000 €'ya ulaştığını belirtmiştir (Moeller ve Görsch, 2015).

Subramanian vd. (2012), 2011 yılında ABD'de incelenen 39 çamur anaerobik çürütücü tankından 32'sinde 5 yıldır düzenli aralıklarla köpük sorunlarının yaşandığını tespit etmişlerdir.

Almanya'nın Saksonya eyaletindeki tarımsal biyogaz tesislerine yapılan bir anket, yenilenebilir kaynak kullanan 36 biyogaz tesisinden 5'inde köpük oluştuğunu göstermiştir (Brückner, 2013).

Danimarka'daki biyogaz tesislerine yapılan bir araştırma ise 16 tam ölçekli biyogaz tesisinden 15'inin çürütücüde ve/veya ön depolama besleme tankında köpük problemleri yaşadığını ortaya koymuştur (Kougias vd., 2014).

Almanya'nın Baden-Württemberg eyaletinde uzmanlar ve biyogaz tesisi işletmecileriyle yapılan başka bir anket, 500 biyogaz tesisinin yaklaşık %10–15'inin köpük problemi yaşadığını göstermiştir (Wissmann, 2014).

Moeller ve Görsch, (2015) yaptıkları çalışmada Kuzeydoğu Almanya'daki 15 biyogaz tesisinden 12'sinin (%80) biyogaz çürütücülerinde köpük oluştuğunu ve bunların %50'sinin bu durumu düzenli olarak yaşadığını bildirmişlerdir.

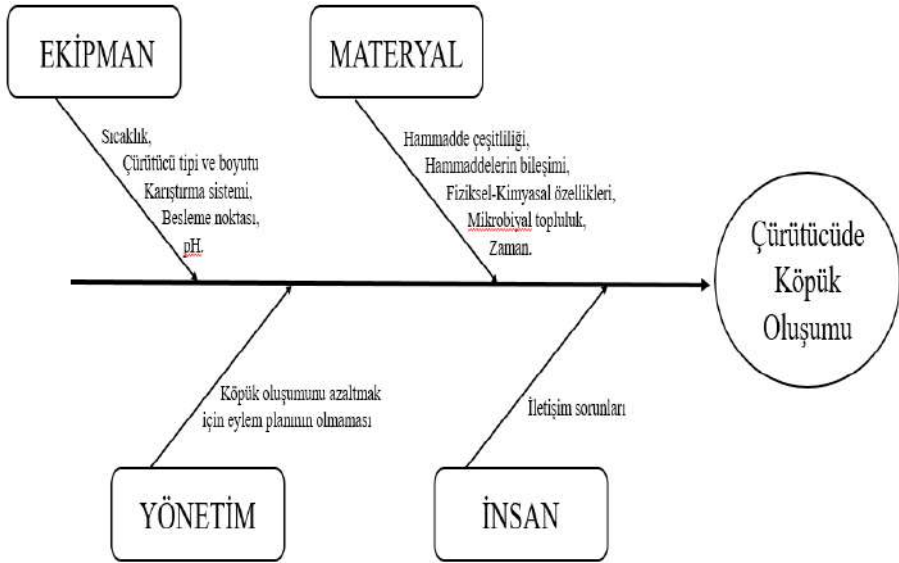
Danimarka ve Almanya'daki tam ölçekli anaerobik çürütücülerde köpüklenme nedeniyle gaz üretiminin %30–50 oranında (bazı durumlarda %90'a kadar) düştüğü ve sistemin tamamen çökmesi sonucu çürütücülerin temizlenip yeniden başlatılması gerektiği bildirilmiştir (Kougias vd., 2014a; Moeller ve Görsch, 2015; Nielsen ve Angelidaki, 2008).

1.1. Köpük Oluşumunun Nedenleri

Çürütücülerde organik yük fazlalığı olduğunda, bakterilerin bu materyalin tamamını parçalayamama durumu oluşabilir. Bu durum, lipidler gibi köpük oluşumunun öncüsü olan hidrofobik maddeler, glikolipid gibi biyosüpfaktanlar, proteinler gibi yüzey aktif maddeler, uçucu yağ asitleri ve uzun zincirli yağ asitleri gibi ara metabolitlerin birikimine yol açar (Bedin vd., 2024, Ganidi vd., 2009; Ganidi vd., 2011).

Aşırı substrat yüklemesi, yanlış karıştırma, elektrik kesintisi, karıştırıcı hasarı, devridaim sisteminin arızalanması gibi süreç aksaklıkları da köpürmeye neden olabilmektedir. (Kaparaju vd., 2008; Kowalczyk vd., 2013; Lienen vd., 2013; He, Li vd., 2017).

Şekil 1'de biyogaz tesislerinde köpük oluşumunu gösteren balık kılçığı diyagram görülmektedir. Sıcaklık, çürütücü tipi, karıştırma sistemi, hammadde, mikrobiyal topluluk ve organik yükleme oranı gibi işletme parametreleri dışında köpük oluşum nedenleri arasında yönetim ve insan faktörleri de etkilidir (Bedin vd., 2024).



Şekil 1. Biyogaz tesislerinde köpük oluşumunu gösteren balık kılçığı diyagramı (Bedin vd., 2024)

1.1.1. Aşırı organik yükleme

Biyogaz çürütücülerinde köpük oluşumlarının tam olarak nedeni bilinmemekle birlikte; yapılan araştırmalar köpürmenin aşırı yükleme nedeniyle oluşabileceğini göstermiştir (Kougias vd., 2013a). Anaerobik çürütücü aşırı organik maddeyle yüklendiğinde, çürütücü içeriği daha viskoz hale gelir ve metana dönüştürülebilenden daha fazla uçucu yağ asidi (VFA) üretilir. Bu koşullar altında, karbondioksit üreten asit oluşturan mikroorganizmalar, metan oluşturan mikroorganizmalara göre çok daha hızlı çalışarak daha fazla CO₂ üretir ve bu da köpük oluşumunu teşvik eder (Arya vd., 2022).

Yüksek organik yükleme oranı (OLR) çürütücüdeki mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini bozarak organik maddelerin kısmi bozulmasına yol açar. Bununla birlikte, her biyogaz tesisinde OLR oranı çürütücü özelliklerine göre belirlenmeli ve besleme miktarları buna göre belirlenmelidir. Örneğin, hammadde olarak gıda atığı beslenen bir biyogaz sisteminde OLR 1.5 gVS·L⁻¹·d⁻¹'yi geçtiğinde, belediye organik katı atıkların beslendiği bir

sistemde OLR 5 $\text{gVS} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 'yi geçtiğinde, bir pirinç samanı ve inek gübresinin birlikte beslendiği çürütücü sisteminde ise OLR 8 $\text{gVS} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 'yi geçtiğinde köpüğün oluştuğunu rapor edilmiştir (Zhang ve Banks 2013; Subramanian ve Pagilla 2014; Tanimu vd. 2015).

Yanlış çürütücü tasarımları ve yetersiz karıştırma, etkin çürüme hacminde azalmaya ve buna bağlı olarak organik miktarında artışa neden olacak bir "ölü bölge" oluşmasına ve nihayetinde köpük oluşumuna yol açmaktadır (Kong vd., 2019). Özellikle, substrattaki ana yüzey aktif maddeler, varlığı sindirim ürününün yüzey gerilimini azaltıp kabarcıklar oluşturabilen deterjanlar, gresler, proteinler ve diğer organik partikül maddelerdir. Genel kanı, yüksek OLR'li çürütücülerde köpüğün kolayca oluştuğu yönündedir (Kougias vd., 2013c, Dalmau vd., 2010).

Kougias vd. (2014), Danimarka'da gübre bazlı tam ölçekli biyogaz tesislerinde köpük oluşumunun başlıca nedeninin organik aşırı yükleme olduğunu bildirmiştir. Uygun olmayan substratların kullanılmasının yanı sıra, kolayca bozunabilen maddelerin aşırı oranda çürütücüye beslenmesi de biyogaz üreten mikroorganizmaların aşırı yüklenmesine yol açar. Bununla birlikte; beslenmesi yetersiz karıştırma, ani sıcaklık dalgalanmaları, rejime oturmayan tesis prosesleri gibi işletme faktörleri de köpürme nedenleri olarak öne sürülmüştür (Barjenbruch vd., 2000; Barber, 2007).

1.1.2. Karıştırma etkisi

İşletme parametreleri arasında karıştırma, sürecin en kritik unsurlarından biridir. Karıştırma; katıların süspansiyonda kalmasını, ısı ve kütle transferinin artmasını, gazların sıvı fazda dağılmasını sağlar. Ancak aşırı karıştırma, mikroorganizmaların kümeler oluşturma eğilimini bozarak hidrojen transferini olumsuz etkileyebilir (Karlsson vd., 2014). Deneysel araştırmalar, karıştırma tasarımı konusunda çelişkili görüşler olmasına rağmen, karıştırma modu ve karıştırma yoğunluğunun biyogaz verimi üzerinde doğrudan etkileri olduğunu göstermiştir (Lindmark vd., 2014).

Yetersiz veya hatalı karıştırma, çürütücülerde ters katı madde profili oluşmasına ve ölü bölgelerin meydana gelmesine yol açarak

çürütücünün aktif hacmini azaltır. Sonuç olarak, biyogaz üretimi kısa veya uzun süreli olarak düşer (Nielsen ve Angelidaki, 2008).

Yetersiz karıştırma ve prosesi besleyen elektrik enerjisinin kesintisi, karıştırma cihazında hasar gibi mekanik arızalar yetersiz ve kesikli karıştırma yaratır ve bu da gaz tutulmasında değişikliğe neden olan kabarcık oluşumu ile köpüklenme arasındaki dengeyi bozar (Kaparaju vd., 2008; Kowalczyk, vd., 2013; He vd., 2017). Uygun karıştırma stratejisi, biyogaz üretim tesisinin gerçek koşullarına göre belirlenmelidir (Lindmark vd., 2014).

1.1.3. Sıcaklık etkisi

Sıcaklık, hacim genişlemesi ve köpük oluşumu için önemli bir faktördür (Tchobanoglous vd., 2003). Anaerobik sindirim, mezofilik bakterileri (35°C) veya termofilik bakterileri (55°C) teşvik eden optimum sıcaklıklarda çalışır (Adisa ve Durrant, 2024). Mezofilik anaerobik sindirimde, çürütücüde bulunan amonyak, alkalinite ve uçucu yağ asitlerinin daha düşük olması nedeniyle, termofilik anaerobik sindirime kıyasla daha az köpük oluşumu olasılığı vardır (Siebels ve Long, 2011). Weiland (2010), mezofilik sindirimin termofilik sindirimin aksine sıcaklık dalgalanmalarına uyum sağladığını belirtmektedir.

Sıcaklığın tetiklediği köpürme, sıcaklık dalgalanmasından kaynaklanır (Yang vd., 2021). Araştırmacılar, termofilik koşullarda 1°C'lik gibi düşük sıcak değişimlerinde bile mezofilik koşullara göre daha büyük bir etkiye sahip olduğu ve bunun da mikrobiyal faaliyetleri etkilediği sonucuna varmışlardır (Adisa ve Durrant 2024). Bu nedenle, dalgalanmayı önlemek için anaerobik sindirim sırasında sıcaklığı kontrol etmek gerekir.

Siebels ve Long (2011), laboratuvar koşullarında yaptıkları denemelerde asit fazlı-termofilik sindirici, laboratuvar ölçeğindeki mezofilik sindiriciden daha yüksek bir köpürme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Sıcaklık dalgalanmasının, uçucu asit ve metan oluşturan bakterilerin aktivitelerini bozarak termofilik bir çürütücüde kararsızlığa neden olduğunu belirtilmiştir.

1.1.4. Substrat etkisi

Substratlar aşırı köpük oluşumunun en yaygın nedenleridir. Uygun olmayan substratların kullanılmasının yanı sıra, kolayca bozunabilen maddelerin aşırı oranı da biyogaz üreten mikroorganizmaların kapasiteleri üzerinde yüklenmesine yol açar (Moeller vd., 2012c). Yüksek oranda azot ve/veya protein içeren substratlar (ör. yonca, kümes hayvanı gübresi, mezbaha atıkları), kolay parçalanabilir substratlar (ör. şeker pancarı parçaları, meyve ve sebze atıkları) veya kendiliğinden yüzey aktif bileşikler olarak davranan substratlar (ör. lesitin, yağ ayırıcı içeriği, deterjanlar) hızlı hidrolitik ve asidojenik reaksiyon adımlarında asidik ara ürünler veya sıvı fazın yüzey gerilimini azaltan metabolitler oluşturdıklarından dolayı köpük oluşumuna neden olabilirler (Ganidi vd., 2009, Moeller vd., 2012b).

Bir substrat bileşenine bağlı köpürme genellikle substratın aşırı yüklemesi ile ilişkilidir (Lienen vd., 2013) veya substratın çürütücüye aniden eklenmesi (Moeller ve Görsch, 2015) ile ortaya çıkmaktadır. Hem substrat türü hem de yükleme kararlı olduğunda, köpürme genellikle substrat bileşimiyle tetiklenmez (Yang vd., 2021).

Boe vd. (2012), yaptıkları çalışmada çeşitli substratların ve ara bileşiklerin bir çürütme sisteminde köpürme üzerindeki etkisini karşılaştırmış ve yüksek lipid veya protein içeriğinin köpürmeyi teşvik edebileceğini bildirmiştir. Bunun yanında Moeller vd., (2012a) büyük miktarlarda hayvansal proteinin beslenmesi sonucu fermentörlerde köpük oluşumu riskinin arttığını bildirmişlerdir.

Moeller vd. (2012c), yaptıkları araştırmada, bir biyogaz tesisine büyük miktarlarda hayvansal protein beslendiğinde aşırı köpük oluşumu riski arttığını belirtmişlerdir ayrıca çalışmada balık atığının anaerobik fermentasyon için özellikle sorunlu olduğu tespit edilmiştir. Aynı çalışmada bir kağıt fabrikasından gelen atıkların da köpük oluşumuna neden olduğu bildirilmiştir.

Ülkemizde son yıllarda, yoğun bir şekilde gerçekleştirilen tarım ve hayvancılık faaliyetleri sonucu oluşan gübrelerin ve diğer organik atıkların biyogaz tesislerinde işlenerek elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmesine yönelik çalışmalar ve devlet destekleri hızla artmış, birçok biyogaz tesisi devreye alınmıştır. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın temmuz 2025'te yayımladığı listeye göre Türkiye

genelinde hammadde olarak tarımsal atık kullanan 62 adet biyogaz üretim tesisi bulunmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2025). Fakat hammadde olarak tarımsal atık kullanan biyogaz tesislerinin yönetimindeki; aşırı besleme oranları, küf ve mikotoksin içeren bozulmuş silaj kullanımı gibi hatalar aşırı köpüklenmeye yol açabilir.

En yaygın köpük oluşturan substratlardan biri, yüksek miktarda nitrojen içeren tavuk gübresidir. Fermentasyon substratındaki aşırı azot (N) konsantrasyonları, biyogaz çürütücüsündeki mikrobiyal topluluğu inhibe ederek içeriğin köpük üretmesini sağlar (Schumann ve Gurgel, 2007).

Tahıllar, mikroorganizmalar tarafından kolayca biyogaza dönüştürüldüğü ve biyogaz verimi yüksek olduğundan biyogaz üretim tesislerinde tercih edilen hammaddelerdir. Tahıl, biyogaz üretiminde genellikle iri taneli olarak kullanılır ve anaerobik sindirim sürecinde aşırı köpük oluşumuna neden olur (Moeller vd., 2012b).

Moeller vd. (2016) yaptıkları çalışmada, tahıllarda tane bazlı köpük oluşumunun nedenlerini araştırmak ve köpürme problemlerini en aza indirecek yöntemler geliştirmek amacıyla tritikale, buğday, çavdar, arpa, yulaf ve darı olmak üzere altı örnek tahıl türü kullanılarak kapsamlı köpük deneyleri yapmış ve köpük oluşum yoğunluğunun sadece tane türüne değil, aynı zamanda kaba tanenin işlenmesine de bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. En yoğun köpük oluşumu buğday ve tritikalede gözlemlenirken, tane ne kadar ince öğütülürse, test şişelerindeki köpük içeriği o kadar yüksek olmuştur. Soya fasulyesi yağının kaba taneye eklenmesi, köpük yoğunluğunda bir azalmaya yol açmıştır.

Biyogaz çürütücüsüne şeker pancarı ve şeker pancarı küspesi eklenmesi de çürütücüde köpürmeye neden olmaktadır. Bunun nedeni, şeker pancarının kuru maddede %16'ya kadar sakaroz (şeker) içermesidir (Stoyanova vd., 2013; Moeller ve Görsch, 2015). Bu kolayca kullanılabilen substrat varlığı, mikroorganizmaların hızlı üremesine ve tesisin aşırı yüklenmesine yol açar. Yapılan araştırmalarda, şeker pancarının dozajlanması sırasındaki aşırı yüklemenin biyogaz çürütücülerinde köpürmeye neden olduğu görülmüştür (Moeller vd., 2012c; Körber vd. 2022).

1.2. Köpürme Potansiyeli Metodolojisi ve Hesaplaması

Köpürme potansiyeli, çeşitli proses parametrelerinin etkisi altında bir biyogaz fermentöründe köpürme olasılığını değerlendirmek için kullanılan bir indekstir. Spesifik olarak iki gösterge içerir: köpürme potansiyeli (KP) ve köpük stabilitesi (KS). Çoğu araştırmacı, KP'nin tam ölçekli anaerobik çürütücülerin köpürme riskini rutin olarak izlemek için değerli bir araç olduğuna inanmaktadır (Yang vd., 2021).

Köpürme potansiyelinin saptanması için köpürme deneyleri sırasında numunenin belli bir miktarı (V_0) deneme fermentörüne alınmakta ve üzerine maya eklenmektedir. Köpürme sırasında oluşacak maksimum köpük hacmi (V_{max}), köpürtme işlemi sırasında köpük hacminin yarı yarıya ($t_{1/2}$) azalması için gereken süre ve maksimum köpük yüksekliği (H_{max}) kaydedilmektedir. Köpürme Potansiyeli ve köpük kararlılığı aşağıdaki formüllere göre hesaplanmakta, ardından köpük giderici uygulamalar sonucunda belirli zaman aralıklarında (0, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120 dakika) köpüğün yüksekliğindeki düşüş kaydedilmektedir (Yang vd., 2021).

$$\text{Köpürme Potansiyeli (KP)} = V_{max}/V_0$$

$$\text{Köpük kararlılığı (KS)} = tt_{1/2}$$

1.3. Köpük Kontrol Yöntemleri

Verimli ve sürdürülebilir biyogaz üretmek için köpürme sorunları ele alınmalıdır. Bununla birlikte, seçilen çözümlerin veya yaklaşımların köpürmeyi gidermesinin yanı sıra biyogaz üretimini tehlikeye atmadan uzun ömürlü, çevre dostu ve ekonomik bir çözüm sağlaması gerekmektedir (Mokoena ve Matambo, 2025).

Köpük oluşumunu önlemek ve/veya bastırmak için etkili bir strateji uygulanması şarttır. Ancak, köpüğün nedenlerini belirlemek her zaman kesin ve başarılı bir anti-köpük stratejisinin uygulanmasını garanti etmez. Bunun nedeni, köpüğün karmaşık bir yapıya sahip olması ve köpük olaylarının meydana geldiği uygulamaların çok çeşitli olmasıdır; bu da etkin ve hassas köpük bastırma çözümleri gerektirebilir (Kougias vd., 2014).

Köpük oluşumunu önlemek için; köpüğün karıştırılması, anti-köpük malzemelerinin eklenmesi (Kougias vd., 2013a, 2013b), üç veya dört gün boyunca substrat beslemenin minimize edilmesi (açlık diyeti)

ve biyogaz çürütücüsünde karıştırma süreleri ve besleme döngülerinin değiştirilmesi (Moeller vd., 2013; Moeller ve Görsch, 2015) gibi çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Ancak, köpük bastırmanın en güvenli yöntemi, köpüğün oluşumunu önlemektir.

Günümüzde, anti-köpük ajanı olarak kullanılabilecek birçok ticari ürün mevcuttur (Junker, 2007). Ancak, bir anti-köpük ajanının her uygulama için uygun olmadığı bilinmektedir (Routledge ve Bill, 2012). Anti-köpükler, aşırı köpük oluşumunu önlemek için köpük oluşmadan önce çözeltiye eklenen bileşikleri içerirken, köpük kırıcılar köpük oluştuğunda eklenir ve kısa sürede köpüğü parçalayabilir (Miller, 2008). Ancak uygulamada, anti-köpük ve köpük kırıcı terimleri genellikle köpüğü ortadan kaldırabilen bileşikleri ifade etmek için eşanlamli olarak kullanılmaktadır (Kougias vd., 2013a).

Gıda atıklarının anaerobik çürütülmesinde, köpüklenme riskini azaltmak için hidrotermal ön işlem kullanılabilir. Hidrotermal ön işlem, hücre yapısını bozabilir ve hücrenin içinden organik molekülleri serbest bırakabilir, bu da viskozitede önemli bir azalmaya ve köpürme riskinin azalmasına neden olabilir (Jia vd., 2019).

Bedin vd. (2025), yaptıkları deneysel çalışmalar ile, biyogaz proseslerinde köpük oluşumunu en aza indiren başlıca mekanik ve fiziksel parametreleri şu şekilde sıralamışlardır;

- Substrat–mikroorganizma–besin etkileşimini ve sistem homojenliğini korumak amacıyla aşırıya kaçmadan gerçekleştirilen yeterli düzeyde karıştırma,
- Karıştırıcı yüksekliğinin köpük seviyesine uyumlu olacak şekilde ayarlanması ve bu yolla köpüğün mekanik temasla parçalanması,
- Yağ, gres ve benzeri lipid içeren substratların işlenmesinde uygun karıştırma sürelerinin belirlenmesiyle lipid tabakasının etkin bir şekilde parçalanması,
- Prosesin istikrarını bozabilecek sıcaklık dalgalanmalarının azaltılması.

Bedin vd. (2025), köpük oluşumunu en aza indiren temel biyolojik ve kimyasal parametreleri şu şekilde özetlemişlerdir;

- Hidrofobik yan ürünlerin, yüzey aktif maddelerin ve biyosüpfaktanların birikiminin yanı sıra dengesiz mikrobiyal

aktivitenin önlenmesi amacıyla biyolojik sindirim ortamında uygun organik madde içeriğinin sağlanması,

- Köpük lamelinde bulunan yüzey aktif madde moleküllerini yer değiştirerek elastikiyetini azaltmak için köpük önleyici maddelerin kullanılması,
- Köpük yapısını dönüştürmek, dengeleyici proteinleri parçalamak ve aynı zamanda metanojenik bakterilerin aktivitesini teşvik etmek amacıyla enzimatik ön işlemlerin uygulanması.

Kong vd. (2019), yaptıkları çalışmada çürütücüye FeO_2 eklemenin biyo-köpük oluşumunu engellemek için etkili bir yöntem olduğunu ve çürütücünün çalışma kararlılığını artırabileceğini belirlemişlerdir.

Bade vd. (2025), şeker pancarı silajının anaerobik sindiriminde köpüğe neden olan bileşikler araştırıldıkları çalışmada, pektinin şeker pancarı silajının anaerobik sindirimi sırasında köpürmeye birincil katkıda bulunan faktör olduğu belirlemişlerdir. Pektinaz enzimi ile yapılan enzimatik ön işlemin köpürmeyi %30 azalttığı görülmüştür. Aynı çalışmada, yedi farklı bitkisel yağın köpük önleyici etkisi karşılaştırılmış; ayçiçek yağının en yüksek verimliliğe sahip olduğu, soya yağının ise neredeyse hiç etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Kolay bulunabilmesi nedeniyle köpük önleyici madde olarak genellikle bitkisel yağlar kullanılmaktadır. Avantajları sadece kolay temin edilebilirliği değil, aynı zamanda biyogaz tesisinde tamamen metabolize edilebilen doğal bir madde olmasıdır. Bazı köpük türleri için, küçük miktarlarda kolza tohumu yağının bile köpük azaltma açısından iyi bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Süt işleme tesisi atık suyunun beslenmesi nedeniyle köpük oluşumunun görüldüğü bir biyogaz tesisinde, yalnızca üç litre yağın eklenmesi tüm köpük tabakasını ortadan kaldırmıştır (Moeller vd., 2012b). Kougias vd. (2015), çalışmalarında protein ve lipid kaynaklı köpüklenmeyi önlemek için kolza yağı ve oleik asit kullanmış, en etkili ajan olarak kolza yağının önermiştir.

2. MATERYAL ve METOD

Biyogaz santralleri sürdürülebilir atık yönetimi için etkili bir fırsat sunmaktadır. Bu çalışmada biyogaz tesislerinde sıkça karşılaşılan köpürme probleminin nedenlerini, etkilerini ve çözüm yaklaşımlarını belirleyerek işletme mühendislerinin görüşleri doğrultusunda

değerlendirme yapılmıştır. Bu amaçla, çalışmada nicel araştırma yöntemi kullanılarak anket yoluyla veri toplanmıştır. Veri toplama sürecinde hazırlanan anket soruları, tesis mühendislerine iletilerek sonuçlar toplanmış sonrasında Microsoft Excel programı aracılığıyla analiz edilmiştir.

Türkiye genelinde faaliyet gösteren 34 farklı biyogaz tesisinde görev yapan saha mühendisleriyle yapılan anket çalışmasında her işletme için köpürme problemleri irdelenmiştir. Anket katılımcılarına araştırmanın amacı açıklanmış, gönüllülük esasına dayalı olarak yanıtlar toplanmış ve elde edilen veriler anonim şekilde değerlendirilmiştir.

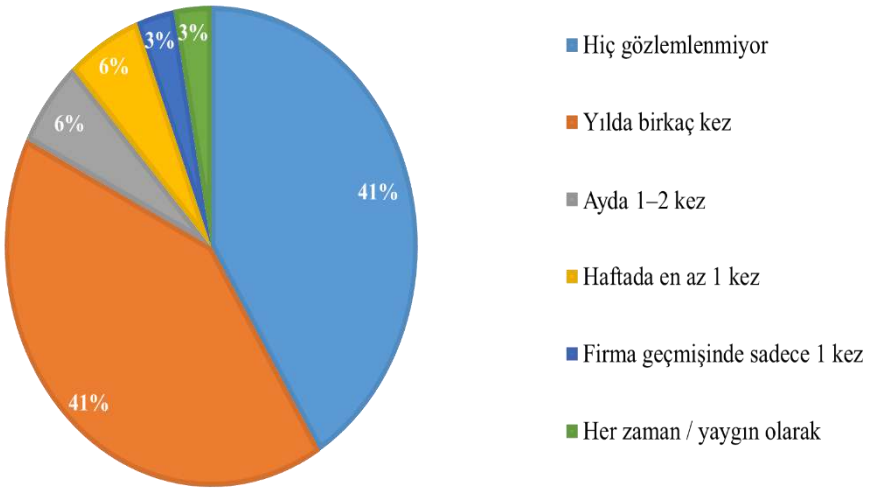
Veri toplama aracı olarak kullanılan anket formu, literatür ve saha deneyimlerine dayanarak geliştirilen 10 kapalı uçlu sorudan oluşan kısa bir araçtır. Ayrıca, mühendislerin konuya ilişkin deneyimlerini ve çözüm önerilerini ortaya koyabilmek amacıyla açık uçlu ek 1 adet soru da eklenmiştir. Anket soruları aşağıdaki gibidir;

1. Köpürme problemi işletmenizde ne sıklıkla görülmektedir?
2. İşletmenizde köpük izleme için hangi yöntemler kullanılmaktadır?
3. İşletmenizde gözlemlediğiniz köpürmeler genellikle hangi prosese bağlı oluşmaktadır?
4. İşletmenizde köpürme meydana geldiğinde hangi hammaddeler kullanılmış olabilir?
5. Köpürme oluşturan substrat özelliklerinden hangileri daha belirleyicidir?
6. İşletmenizde köpük oluştuğunda hangi kontrol yöntemleri kullanılmaktadır?
7. Kimyasal köpük kesicilerin etkinliğine dair görüşünüz nedir?
8. Köpürme müdahalesinde personelin eğitim ve tecrübesi yeterli midir?
9. Köpürme oluşumu işletmenizde ne tür proses parametrelerini olumsuz etkilemektedir?
10. Köpürmenin tesis işletme maliyetinize etkisi nedir?
11. Tesisinizde köpürme probleminin temel nedenleri ve çözüm önerileriniz nelerdir? Kısa bir şekilde paylaşınız.

Son aşamada saha mühendislerinin köpürme sorunlarına ilişkin yorum ve önerileri, literatürdeki bulgularla birlikte değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda köpürme probleminin çözümüne yönelik uygulamaya dönük çıkarımlar geliştirilmiştir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

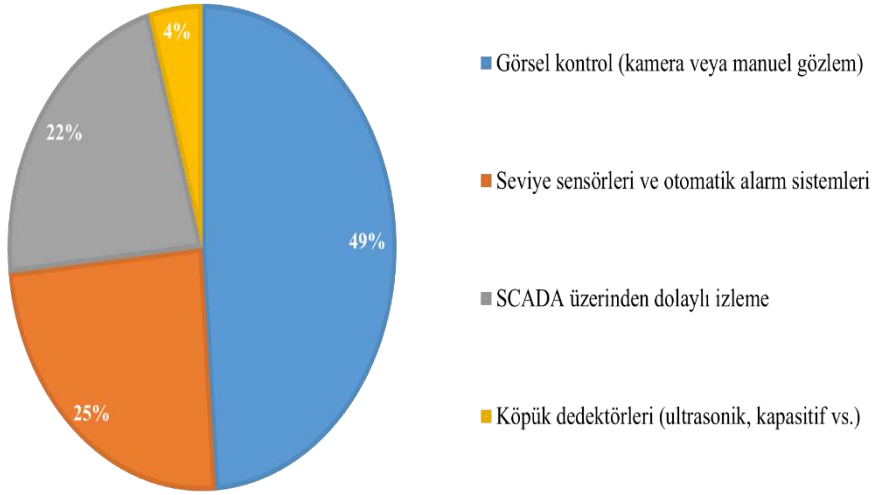
Gerçekleştirilen anket çalışması ile biyogaz tesislerinde köpürme problemlerinin sık yaşanan bir olgu olduğu görülmüştür. Saha mühendislerinin yanıtlarına göre, köpürme probleminin her işletmede farklı düzeylerde ortaya çıktığı saptanmıştır. Katılımcıların %41'i tesis geçmişinde herhangi bir köpürme probleminin yaşanmadığını belirtirken kalan %59'luk kısmın firma geçmişinde en az bir kez olacak şekilde köpürme problemleri ile karşılaştığı tespit edilmiştir (Şekil 2). Bu sonuçlar, köpürmenin tesislerin büyük çoğunluğunda tekrarlayan bir sorun olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Katılımcı yanıtlarına göre köpürme probleminin görülme sıklığı.

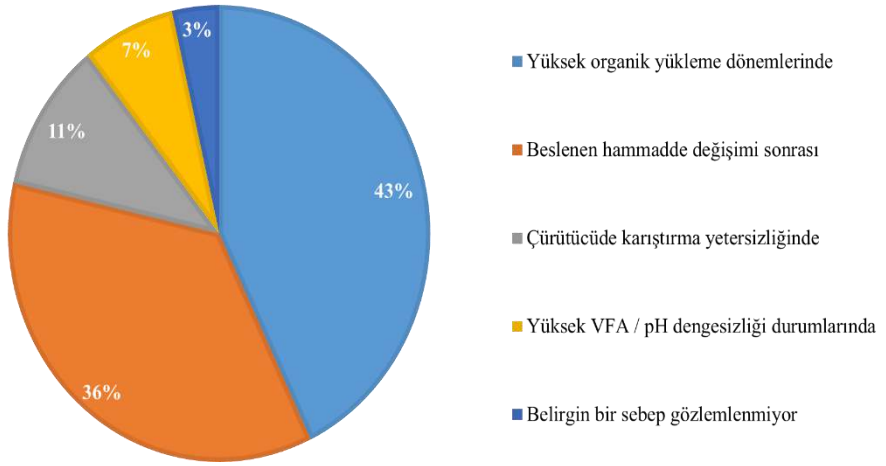
Anket sonuçları ile tesislerin sadece %4'ünde köpük izleme için köpük dedektörünün olduğu, en yaygın kullanılan yöntemin gözlem ve görsel kontrol olduğu görülmüştür (%49), bunu sırasıyla seviye

sensörleri ve otomatik alarm sistemleri (%25) ve SCADA üzerinden dolaylı izleme (%22) takip etmektedir (Şekil 3). Bu bulgular, saha mühendislerinin çoğunlukla pratik ve hızlı gözlem yöntemlerine yöneldiğini göstermektedir. Fakat gözlemsel yöntemler düşük maliyetli olmasına rağmen, sensör ve otomasyon yöntemleri sürekli izlenebilir olduğundan daha güvenilir veri sunmaktadır.



Şekil 3. Katılımcı yanıtlarına göre tesislerde kullanılan köpük izleme yöntemleri.

Köpürmenin hangi prosese bağlı olarak geliştiği incelendiğinde saha mühendislerinin büyük çoğunluğunun çürütücüye yapılan yüksek organik yükleme dönemlerinde köpürme problemleri ile karşılaştığı görülmektedir (%43). Ek olarak, beslenen hammadde değişimi sonrasında (%36) ve çürütücü tanklarının yetersiz karıştırılmasının da (%11) köpürmeye neden olduğunu görülmüştür. Kougias vd., (2014), köpürme olaylarının %19'unun nedenlerinin pratikte tespit edilemediğini, Moller ve Görsch (2015) ise yaptıkları araştırmaya göre, köpüklenme kazalarının daha da yüksek bir yüzdesinin (%23) açıklanamadığını rapor etmişlerdir. Bu çalışma ile ise köpürmelerin sadece %3'ü saha mühendisleri tarafından açıklanamamıştır (Şekil 4).



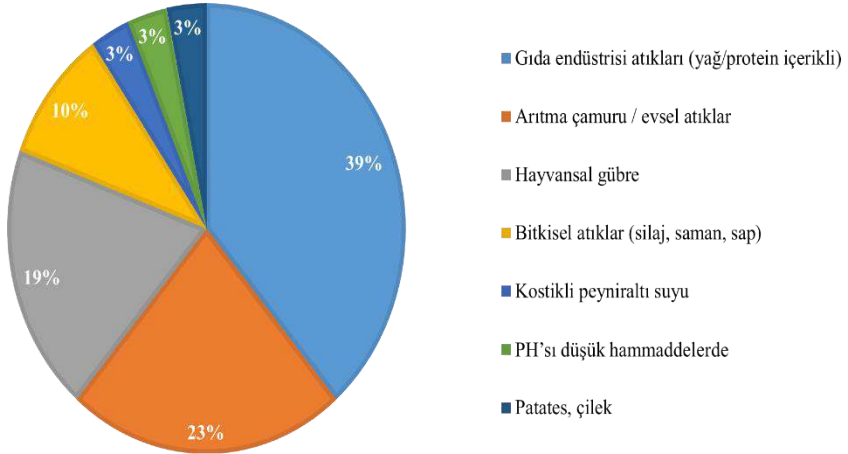
Şekil 4. Katılımcı yanıtlarına göre köpürme problemlerinin bağlı olduğu unsurlar.

Anket sonuçlarına göre, köpürme problemlerinin en çok hangi hammaddelerin kullanımına bağlı olarak ortaya çıktığı kaydedilmiştir. En fazla protein ve yağ içerikli gıda endüstrisi atıklarının çürütücüye beslenmesiyle köpürme yaşandığı saptanmış (%39) bunu %29 ile hayvansal gübre ve bitkisel atıklar gibi tarımsal atıklar takip etmiştir (Şekil 5).

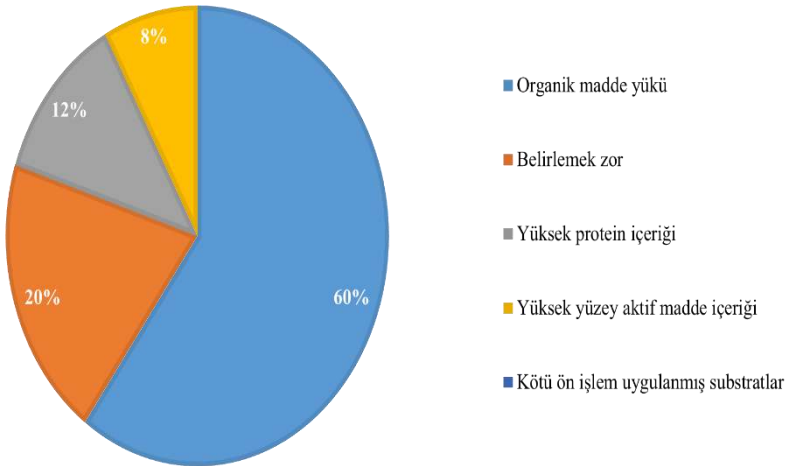
Ayrıca anket sonuçlarına göre katılımcıların %60'ı beslenen hammaddenin organik yükü sebebiyle köpük oluştuğunu, %12'si ise hammaddedeki yüksek protein içeriğinin köpürmeye neden olduğunu vurgulamışlardır. Katılımcıların hiçbiri kötü ön işlem uygulanmış substratların köpürme ile bir bağlantısı olduğunu belirtmemiştir ancak %20 oranında köpürme oluşturan hammaddenin hangi özelliğinin köpürmeye sebep olduğunu belirlemenin zor olduğunu bildirmişlerdir (Şekil 6).

Saha mühendislerinin gözlemleri ve ankete verdikleri cevaplar, literatür bulgularıyla örtüşmekte, köpürme riskinin hammadde seçimi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir (Ganidi vd., 2009, Boe vd., 2012; Moeller vd., 2012a; Moeller vd., 2012b; Moeller vd., 2012c; Yang vd., 2021). Bu nedenle, hammaddelerin doğru seçimi ve dengeli

kullanımı, köpürme probleminin önlenmesinde kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

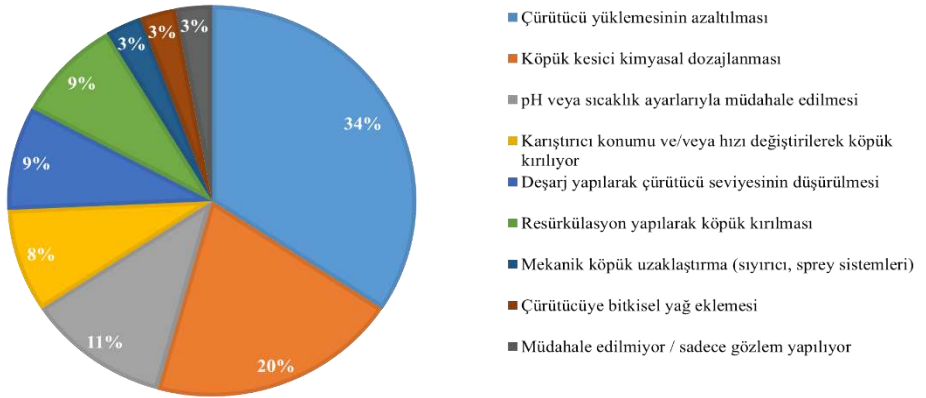


Şekil 5. Katılımcı yanıtlarına göre köpürmeye sebep olduğu düşünülen hammaddeler.



Şekil 6. Katılımcı yanıtlarına göre köpürme oluşturan hammadde özellikleri.

Katılımcı yanıtlarına göre biyogaz çürütücüsünde köpük oluşumu sonrasında uygulanan kontrol yöntemleri çeşitlilik göstermektedir. Genellikle çürütücüde köpürme gözlemlenmesiyle birlikte çürütücüye yapılan hammadde yüklemesi azaltılmakta (%34), köpürmenin devam etmesiyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik birçok önlem alınmaktadır. Bunlar sırasıyla; çürütücüye köpük kesici kimyasal dozajlanması (%20), çürütücü çamurunun pH ve/veya sıcaklık değerlerinin ayarlanması (%11), karıştırıcı konumu ve/veya hızının değiştirilmesi (%11) gibi birçok yöntemdir. Şekil 7’de katılımcıların sahada kullandıkları köpük kontrol yöntemleri verilmiştir.



Şekil 7. Katılımcı yanıtlarına göre köpük oluştuğunda kullanılan kontrol yöntemleri.

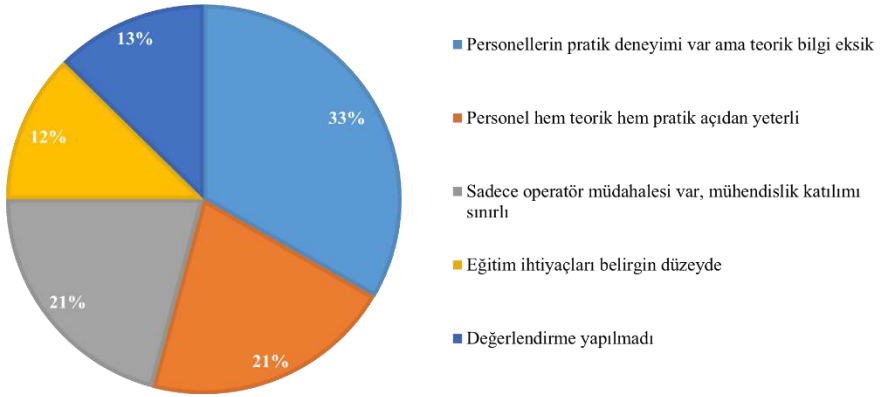
Katılımcıların ağırlıklı olarak fiziksel köpük kesici yöntemler kullandığı, kimyasal köpük kesicileri tesislerin %52’sinde hiç denenmediği, kısa süreli etkisi ve maliyeti (%32), prosese zarar vereceği (%4) düşünceleri sebebiyle kullanımının sınırlı olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılan anket kapsamındaki hiçbir tesisin bu yöntemi düzenli kullanmadığı (%0) ve katılımcıların %12’sinin başka çözümler geliştirilmesi gerektiğini düşündüğü görülmektedir (Şekil 8).

Katılımcılar, biyogaz çürütücülerinde köpük oluşumunu tetikleyen koşulların araştırılması ve köpük oluşumunun öngörülmesi ile önlenmesi için teknik çözümler geliştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.



Şekil 8. Katılımcıların kimyasal köpük kesicilere dair görüşleri.

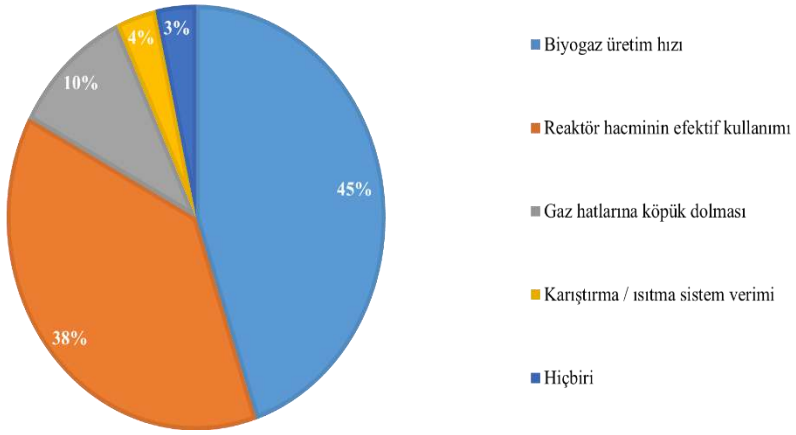
Katılımcılar tarafından, köpürmenin meydana gelmesi durumunda müdahalede bulunan personellerin %21'inin hem teorik hem pratik açıdan yeterli görülürken, %33'ünün ise sadece pratik deneyimi olduğu bildirilmiştir. Katılımcıların %21'i sadece operatör müdahalesi olduğunu, mühendislik yaklaşımıyla olan katılımın sınırlı olduğunu ifade etmiş, %12'si ise personelin konuyla alakalı eğitilmesi gerektiğini vurgulamıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Personelin köpürme müdahalelerindeki yetkinliği hakkındaki katılımcı görüşleri.

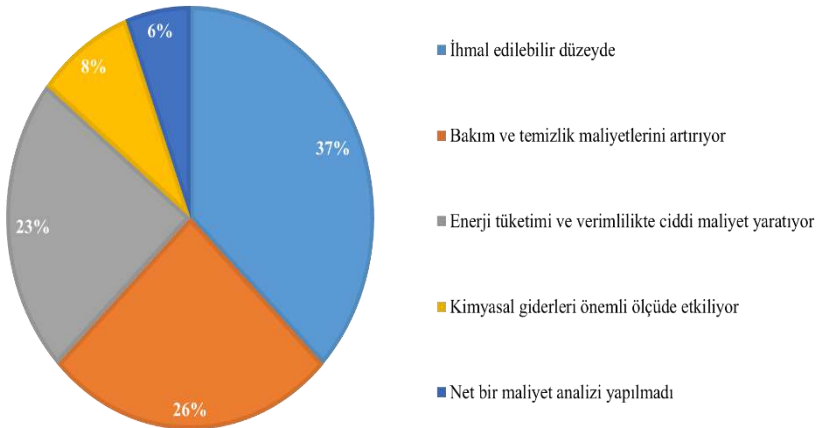
Anketten elde edilen bulgular, köpürme probleminin yalnızca teorik bir biyogaz işletme sorunu olmadığını, pratikte de ciddi kayıplara ve işletme zorluklarına neden olduğunu göstermektedir. Saha mühendisleri köpürmenin, özellikle gaz üretim hızını (%45) düşürdüğünü, çürütücü hacminin efektif kullanımını engellediğini (%38), karıştırma ve ısıtma verimini düşürdüğünü (%4) belirtmişlerdir (Şekil 10).

Bu sonuçlar, literatürde köpürmenin biyogaz tesislerinde proses stabilitesini bozarak enerji verimliliğini olumsuz etkilediğini gösteren çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Kougias vd. 2014; Wang vd, 2018; Kong vd, 2019; Tyagi vd, 2018).



Şekil 10. Katılımcı yanıtlarına göre köpürmenin olumsuz etkilediği proses parametreleri.

Çürütücülerde köpürmenin sık görülmesiyle, önemli ekonomik kayıplara yol açabilen, biyogaz üretimini ve verimliliğini azalabilmektedir. Ayrıca, köpürme sonucu çamurunun taşması ve çürütücü patlamaları gibi çevre ve güvenlik risklerinin artması çalışma zorluğunu beraberinde getirmektedir. Anket katılımcılarının %26'sı köpürmenin bakım ve temizlik maliyetini arttırdığını, %23'ü enerji verimliliğini olumsuz etkileyerek ekonomik kayıplara neden olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 11).



Şekil 11. Katılımcı yanıtlarına göre köpürmenin işletme maliyetlerine etkisi.

Bu çalışmada, saha mühendislerinden toplanan veriler ve literatür bulguları arasında güçlü bir bağ olduğu görülmektedir. Köpürmenin sıklığı ve nedenlerine ilişkin katılımcı cevapları, problemin çok aşamalı olduğunu, köpürmenin hem işletme parametreleri hem de kullanılan hammaddelerden etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle köpürme probleminin çözümü için her tesisin, işletme parametreleri göz önüne alınarak kendine özgü stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, biyogaz tesislerinde köpürme olgusunun karmaşık yapısı, operasyonel, ekonomik ve çevresel etkileri incelenmiştir. Anket çalışması sonuçlarının ve literatürlerin birlikte değerlendirmeleri, köpürme probleminin temelinde, çürütücü içindeki mikrobiyal dengenin ve proses stabilitesinin bozulmasının yattığını açıkça ortaya koymaktadır. Köpürme oluşumunun ve sebeplerinin doğru teşhisi, sorunun kalıcı çözümü için en kritik aşamayı oluşturmaktadır. Proses parametrelerinin optimize edilmesi, substrat yönetimi ve fiziksel tasarım iyileştirmeleri gibi önleyici stratejiler, reaktif müdahalelere (köpük kesici kullanımı gibi) kıyasla daha sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm yolu sunmaktadır. Sonuç olarak, köpürme kontrolü, bir arıza giderme meselesi olmaktan çıkarılarak, tesisin genel verimliliğini ve dayanıklılığını artıran entegre bir proses yönetimi stratejisinin parçası haline getirilmelidir. Organik atıklardan enerji üretiminin giderek yaygınlaştığı günümüzde, bu tür çalışmalar, sektördeki teknik rezervlerin geliştirilmesine ve kaynak kullanım verimliliğinin artırılmasına önemli katkı sağlayacaktır.

Araştırma bulguları ve endüstriyel deneyimler ışığında, biyogaz tesislerinde köpürme probleminin önlenmesi ve yönetilmesi için yapılan öneriler aşağıdaki şekilde 4 temel grup altında sıralanmıştır:

1. Proses Stabilizasyonu ve Optimizasyonu:

- Köpüğün, çürütücü kararsızlığının bir sonucu olduğu temel prensibi göz önüne alınmalı ve çürütücü stabilitesini artırmaya yönelik yöntemlere öncelik verilmelidir.

- Çürütücü sıcaklığı optimum düzeyde sabit tutulmalı, ani sıcaklık değişimlerinden kaçınılmalıdır.
- Çürütücüde uygun bir karıştırma frekansı ve süresi seçilerek homojen bir ortam sağlanmalıdır.

2. Substrat ve Besleme Yönetimi:

- Çürütücüye beslenecek Organik Yükleme Oranı (OLR) titizlikle hesaplanmalı ve sürekli izlenmelidir.
- Besleme oranı, çürütücüdeki atık çıkışına ve proses stabilitesine göre belirlenmeli; yüksek gaz çıkışı istenmesi halinde körü körüne yüksek tonajlı beslemeden kaçınılmalıdır.
- Besleme tek seferde ve yüksek miktarda yapılmamalı, bunun yerine besleme sıklığı artırılarak sistemin şoka girmesi önlenmelidir.
- Köpük oluşturan substratlar mümkünse uzaklaştırılmalı veya bu substratların besleme yoğunluğu iyi ayarlanmalıdır.
- Substrata seyreltme, termal işlem gibi ön işlemler uygulanarak köpüklenme potansiyeli düşürülebilir.
- Beslemelerin yetersiz olması da köpürmeye sebep olabileceğinden, çürütücülere düzenli ve dengeli besin takviyesi yapılmalıdır.

3. Tesis Tasarımı ve Teknik Altyapı:

- Biyogaz çürütücüsündeki köpürme, biyogaz tahliye hatlarını tıkayabilir. Bu nedenle bu hatlar mümkün olduğunca çürütücünün üst kısımlarına yerleştirilmelidir.
- Gaz hatlarına, köpüğün sisteme dolmasını engelleyecek köpük tuzakları entegre edilmelidir.
- Çürütücünün gaz bölmesine, aşırı köpük oluşumu durumunda erken uyarı verecek bir köpük sensörü takılmalıdır.
- Köpük kesici (bitkisel yağlar veya kimyasal ajanlar) püskürtme düzenekleri kurulacaksa, bu sistemlerin sürekli korozyon gaza maruz kalacağı unutulmamalı ve buna uygun malzeme ve tasarım seçilmelidir.

4. Personel Eğitimi ve Acil Müdahale:

- Köpürme meydana geldiğinde personelin ilk müdahalesinin hızlı ve doğru olması, sürecin stabilitesi ve gaz kayıplarının önlenmesi açısından hayati öneme sahiptir.
- Bu kapsamda, personelin proses kontrolü, köpük tespit yöntemleri ve acil müdahale protokollerine tamamen hakim olması sağlanmalıdır. Tüm yetkili personel konu hakkında düzenli olarak bilgilendirilmeli ve eğitilmelidir.

KAYNAKÇA

- Adisa, A. O., & Durrant, A. (2024). *Foam control mechanism in anaerobic digestion system*. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1742>
- Arya, D., Kumar, A., & Chand, P. (2022). Prediction of foaming in biogas digesters. *International Journal of Advances in Engineering and Management*, 4(9), 78-80.
- Bade, F., Kleinstaub, S., & Moeller, L. (2025). Foam formation during anaerobic digestion of sugar beet silage: Causes and countermeasures. *Bioresource Technology*, 437, 133180.
- Barber, W. (2005). Anaerobic digester foaming: Causes and solutions. *Water*, 21, 45-49.
- Barjenbruch, M., Hoffmann, H., Kopplow, O., & Traenckner, J. (2000). Minimizing of foaming in digesters by pre-treatment of the surplus-sludge. *Water Science and Technology*, 42(9), 235-241.
- Bedin, S., Miura, T. M., Morguette, A. E. B., Oliveira, A. C., Lopes, D. D., & Bonfim-Rocha, L. (2024). Strategies for effective foam mitigation in industrial biodigestors: A state-of-the-art analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 191(Part A), 1504-1515.
- Bedin, S., Lopes, G. F., Morguette, A. E. B., Camargo de Oliveira, A., Lopes, D. D., & Bonfim-Rocha, L. (2025). *Experimental investigation of foam generation factors and alternatives for its minimization in anaerobic digestion systems*. SSRN. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5122738>

- Brückner, C. (2013). *Biogas in Sachsen–Aktueller Stand* [Biogas in Saxony–Current Stage].
- Dalmau, J., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., Pagilla, K., & Steyer, J. P. (2010). Model development and simulation for predicting risk of foaming in anaerobic digestion systems. *Bioresource Technology*, 101(12), 4306-4314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.056>
- Ganidi, N., Tyrrel, S., & Cartmell, E. (2009). Anaerobic digestion foaming causes - a review. *Bioresource Technology*, 100(23), 5546-5554. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.024>
- Ganidi, N., Tyrrel, S., & Cartmell, E. (2011). The effect of organic loading rate on foam initiation during mesophilic anaerobic digestion of municipal wastewater sludge. *Bioresource Technology*, 102(12), 6637-6643. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.057>
- Gizlenci, Ş., & Acar, M. (2008). *Enerji bitkileri tarımı ve biyoyakıtlar sektörel rapor (Biyomotorin, Biyoetanol, Biyomas)*. T.C. Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Samsun.
- He, Q., Li, L., Zhao, X., Qu, L., Wu, D., & Peng, X. (2017). Investigation of foaming causes in three mesophilic food waste digesters: Reactor performance and microbial analysis. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10.
- IEA Bioenergy. (2021). *Annual report 2021*. <https://www.ieabioenergy.com/wp->

content/uploads/2022/04/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2021.pdf

- Jia, X., Li, M., Zhu, J., Jiang, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2019). Enhancement split-phase hydrogen production from food waste during dark fermentation: Protein substances degradation and transformation during hydrothermal pre-treatments. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17334-17345. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.199>
- Junker, B. (2007). Foam and its mitigation in fermentation systems. *Biotechnology Progress*, 23(4), 767-784.
- Kaparaçu, P., Buendia, I., Ellegaard, L., & Angelidaki, I. (2008). Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, 99(11), 4919-4928.
- Karlsson, T., Konrad, O., Lumi, M., Schmeier, N. P., Marder, M., Casaril, C. E., Koch, F. F., & Pedroso, A. G. (2014). *Manual básico de biogás* (1st ed.). Editora Univates.
- Kong, X., Liu, J., Yue, X., Li, Y., & Wang, H. (2019). Fe₀ inhibits bio-foam generating in anaerobic digestion reactor under conditions of organic shock loading and re-startup. *Waste Management*, 92, 107-114.
- Körber, M., Weinrich, S., Span, R., & Gerber, M. (2022). Demand-oriented biogas production to cover residual load of an electricity self-sufficient community using a simple kinetic model. *Bioresource Technology*, 361, 127664. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127664>

- Kougias, P. G., Tsapekos, P., Boe, K., & Angelidaki, I. (2013a). Antifoaming effect of chemical compounds in manure biogas reactors. *Water Research*, 47(16), 6280-6288.
- Kougias, P. G., Boe, K., Tsapekos, P., & Angelidaki, I. (2013b). Foam suppression in overload manure-based biogas reactors using antifoaming agents. *Bioresource Technology*, 153, 198-205.
- Kougias, P. G., Boe, K., & Angelidaki, I. (2013c). Effect of organic loading rate and feedstock composition on foaming in manure-based biogas reactors. *Bioresource Technology*, 144, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.028>
- Kougias, P. G., Boe, K., O-Thong, S., Kristensen, L. A., & Angelidaki, I. (2014). Anaerobic digestion foaming in full-scale biogas plants: A survey on causes and solutions. *Water Science and Technology*, 69(4), 889-895.
- Kougias, P. G., Boe, K., Einarsdottir, E. S., & Angelidaki, I. (2015). Counteracting foaming caused by lipids or proteins in biogas reactors using rapeseed oil or oleic acid as antifoaming agents. *Water Research*, 79, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.034>
- Kowalczyk, A., Harnisch, E., Schwede, S., Gerber, M., & Span, R. (2013). Different mixing modes for biogas plants using energy crops. *Applied Energy*, 112, 465-472.
- Lienen, T., Kleybcker, A., & Brehmer, M. (2013). Floating layer formation, foaming, and microbial community structure change in full-scale biogas plant due to disruption of mixing and substrate

- overloading. *Energy, Sustainability and Society*, 3(1), 20. <https://doi.org/10.1186/2192-0567-3-20>
- Lindmark, J., Thorin, E., Bel Fdhila, R., & Dahlquist, E. (2014). Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1030-1047. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.182>
- Miller, C. A. (2008). Antifoaming in aqueous foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 13(3), 177-182.
- Moeller, L., Görsch, K., Müller, R. A., & Zehnsdorf, A. (2012a). Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung – Erfahrungen aus der Praxis. *Landtechnik*, 67(2), 110-113.
- Moeller, L., Goersch, K., Neuhaus, J., Zehnsdorf, A., & Mueller, R. A. (2012b). Comparative review of foam formation in biogas plants and ruminant bloat. *Energy, Sustainability and Society*, 2, 12.
- Moeller, L., Herbes, C., Müller, R., & Zehnsdorf, A. (2012c). Formation and suppression of foam in biogas plants-practical experiences. *Landtechnik*, 67(2), 110-113.
- Moeller, L., Görsch, K., Köster, Y., Müller, R. A., & Zehnsdorf, A. (2013). *Schaumbildung und Schaumvermeidung in Biogasanlagen* [Foam formation and foam suppression in biogas plants]. UFZ-Bericht 01/2013. Helmholtz Centre for Environmental Research.
- Moeller, L., & Görsch, K. (2015). Foam formation in full-scale biogas plants processing biogenic waste. *Energy, Sustainability and Society*, 5(1).

- Moeller, L., Krieg, F., Zehnsdorf, A., & Müller, R. A. (2016). How to avoid foam formation in biogas plants by coarse grain anaerobic digestion. *Chemical Engineering & Technology*, 39(4), 673-679. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500300>
- Mokoena, M., & Matambo, T. S. (2025). Green approaches to solving foaming during biogas production. In *Innovations in the global biogas industry: Applications of green principles* (pp. 107-132). Woodhead Publishing.
- Nielsen, H. B., & Angelidaki, I. (2008). Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. *Bioresource Technology*, 99(17), 7995-8001.
- Oerther, D. B., de los Reyes III, F. L., de los Reyes, M. F., & Raskin, L. (2001). Quantifying filamentous microorganisms in activated sludge before, during, and after an incident of foaming by oligonucleotide probe hybridizations and antibody staining. *Water Research*, 35(14), 3325-3336.
- Routledge, S. J., & Bill, R. M. (2012). The effect of antifoam addition on protein production yields. In *Recombinant protein production in yeast* (pp. 87-97). Springer.
- Schumann, W., & Gurgel, A. (2007). *Schwachstellenanalyse an ausgewählten Biogasanlagen in Mecklenburg-Vorpommern*. In 1. Rostocker Bioenergieforum.
- Siebels, A., & Long, S. (2011). Foaming phenomenon in bench-scale anaerobic digesters. *Water Environment Research*, 85(4), 363-373.

- Stoyanova, E., Forsthuber, B., Pohn, S., Schwarz, C., Fuchs, W., & Bochmann, G. (2014). Reducing the risk of foaming and decreasing viscosity by two-stage anaerobic digestion of sugar beet pressed pulp. *Biodegradation*, 25(2), 277-289. <https://doi.org/10.1007/s10532-013-9659-9>
- Subramanian, B., Pagilla, K., Wold, D., O'Dell, S. E., Poole, A., Long, J. H., Pitt, P., & Sharp, R. P. (2012). Survey of causes and prevention/control of anaerobic digester foaming—A WERF study. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012(6), 7876-7900.
- Subramanian, B., & Pagilla, K. R. (2014). Anaerobic digester foaming in full-scale cylindrical digesters – Effects of organic loading rate, feed characteristics, and mixing. *Bioresource Technology*, 159, 182-192.
- Tanimu, M. I., Ghazi, T. I. M., Harun, M. R., & Idris, A. (2015). Effects of feedstock carbon to nitrogen ratio and organic loading on foaming potential in mesophilic food waste anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 99, 4509-4520.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. McGraw-Hill.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2010). *FNR biyogaz kılavuzu*. Erişim tarihi: 25 Ağustos 2025, https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/leitfaden_biogas_tur_2012.pdf
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2025). *Biyogaz tesisleri*. Erişim tarihi: 25 Ağustos

- 2025, https://www.tarimorman.gov.tr/GKGM/Belgeler/DB_Vet_ilac/hayvansal_yan_urun_isletme/Biyogaz_Tesisleri.pdf
- Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., & Ng, W. J. (2018). Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 380-399.
- Varley, J., Brown, A. K., Boyd, J. W. R., Dodd, P. W., & Gallagher, S. (2004). Dynamic multi-point measurement of foam behaviour for a continuous fermentation over a range of key process variables. *Biochemical Engineering Journal*, 20(1), 61-72.
- Wang, S., Jena, U., & Das, K. C. (2018). Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States. *Energy Conversion and Management*, 173, 143-157.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
- Wissmann, D. (2014). *Untersuchungen zur Schaumbildung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen* [Investigation of the foam formation in agricultural biogas plants] [Diploma thesis, University of Hohenheim].
- Yang, P., Peng, Y., Tan, H., Liu, H., Wu, D., Wang, X., Li, L., & Peng, X. (2021). Foaming mechanisms and control strategies during the anaerobic digestion of organic waste: A critical review. *Science of The Total Environment*, 146531.

Zhang, Y., & Banks, C. J. (2013). Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 33(2), 297-307.

BÖLÜM 2

AĞIR BÜNYELİ TOPRAKLARDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ¹

Arş. Gör. Dr. Tuğba KARAKÖSE

Doç Dr. Ali TEKGÜLER

GİRİŞ

Ağır killi topraklar ıslandığında plastik kıvam almakta ve kurduğunda ise kohezyon kuvvetinin etkisi ile büyük toprak kütleleri oluşmaktadır. Bu toprak kütlelerinin parçalanması güçtür. Bu nedenle ekim için uygun toprak şartlarının sağlanması zordur. Toprağı ekime uygun hale getirmek için birden fazla işlenmesi gerekmektedir. Yine de yeterince parçalanamamaktadır. Bunun sonucunda ise, topraklarda yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Ekim için gerekli koşullar oluşturulmadığı için de verimde azalmalar görülmektedir. Ağır killi topraklar humuslu ve verimli olmasına rağmen toprağı işlemek zordur, bu durum sürdürülebilir ve ekonomik değildir.

Toprak yüzey pürüzlülüğü, toprak yüzeyinde su birikintilerine neden olmakta, bu su birikintileri daha fazla buharlaşmaya maruz kalmaktadır (Lampurlanes ve Martinez, 2006; Altıkat, 2011, Mwendera ve Feyen, 1993; Hansen vd., 1999). Ayrıca pürüzlülük, yüzeydeki toprağın por boyutunu etkilediği için tohumların çimlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Bennicelli vd., 1998; Bjarne vd., 1999; Govers vd., 2000; Kamphorst vd., 2000; Kehl vd., 2005).

Aşırı derecede kuru veya nemli toprak şartları altında yapılan toprak işlemenin büyük ölçüde yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı belirtilmiştir (Burwell vd., 1966).

Toprak yüzey pürüzlülüğü, toprak işleme aletlerinin işleyici organların yapısal özelliğine bağlı olarak değişim göstermektedir (Altıkat, 2011). Toprak yüzey pürüzlülük değerinin belirlenmesinde, farklı yöntemler kullanılmaktadır.

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

Bu yöntemler, pin ve profilmetre yöntemi (Kuipers, 1957; Allamaras vd., 1966; Burwell vd., 1963; Podmore ve Huggins, 1980; Römkens vd., 1986), stereo fotoğraf yöntemi (Wagner, 1995; Zribi vd., 2000), lazer tarayıcı yöntemi (Huang vd., 1988; Huang, 1998; Darboux ve Huang, 2003), zincir yöntemi (Saleh, 1993; Merrill vd., 2001), akustik geri açılım yöntemi (Oelze vd., 2003) ve gölge analiz yöntemi (Moreno vd., 2008) olarak gösterilebilir. Belirtilen metotlarla yapılan ölçümlerde bazı kısıtlayıcı faktörler bulunmaktadır.

Bu kısıtlayıcı faktörlerin etkisiyle profilmetre ve zincir yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Zincir ile pürüzlülük ölçüm yönteminin, pratik kullanımı ve hızlı ölçüm yapması gibi avantajları bulunmaktadır. Killi tınlı toprak şartlarında yüzey düzgünlüğünü belirlemek için yapılan bir çalışmada, zincir ve görüntü işleme yöntemleri arasındaki fark bulunamamıştır (Topakçı, 2010). Çarman (1997) killi topraklarda yüzey pürüzlüğünün kulaklı pulluk uygulamasında %55.10 iken, toprak frezeli uygulamada %33.72 olduğunu tespit etmiştir.

Denemelerinin yapıldığı dönemde yörede yoğun yağışlar görülmekte ve topografyanın etkisiyle taban suyu yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu durum ekimi geciktirmekte, taban suyunun kuruması beklendiğinde ise killi toprak işlenemez hale gelmektedir. Denememizde taban suyunun olumsuz etkilerini gidermek üzere sırta ekim yapılması uygun görülmüştür.

Killi toprakların parçalanabilirliğini artırmak için bir prototip makine tasarlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, killi topraklarda yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktır.

1. MATERYAL ve METOD

Denemeler, 41.21N, 36.85E koordinatlarında ve 14.39 m rakımda, Terme İlçesi Karacalı Mahallesinde bulunan arazide yürütülmüştür. Bu arazisi %50.47 kil, %21.08 silt ve %28.45 kum içeren killi bir bünyeye sahiptir (Şekil 1).



Şekil 1. Denemelerin yapıldığı arazi

Bu topraklarda kullanılacak bir lister ve ekonomikliği sağlamak için bir araçpa frezesi kullanılarak bir kombinasyon oluşturulacaktır.

Toprak işleme denemeleri, 16 da büyüklüğündeki arazide yapılmıştır. Bu arazide 5x15 m'lik parselleri oluşturulmuştur. Bu parsellerin arasında 5x1 m olacak şekilde boşluklar bırakılmıştır. Uygulamalar 5 parselde 4'er tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler tesadüf blokları deneme desenine göre yapılmıştır.

Geleneksel toprak işleme için kulaklı pullukla sürüm yapılmış ardından toprak yüzeyini düzeltme için diskaro ile 3 kez işlenmiştir. Lister ile sırt oluşturulmuş ve sırtların üzeri ara çapa frezesi ile işlenmiştir. Bu işlemler için 100 BG bir traktör kullanılmıştır. Traktörün bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Traktörlere ait bazı teknik özellikler.

Güç üretimi (kW)	73.6 (100 BG)
(min ⁻¹)	2200
Tork, (Nm) / Motor devri (min ⁻¹)	402/1400
Üç nokta askı sisteminin Maks kaldırma kuvveti (kN)	33
Toplam Ağırlık (Kg)	3550
Kuyruk mili devir sayısı (min ⁻¹)	540/540E

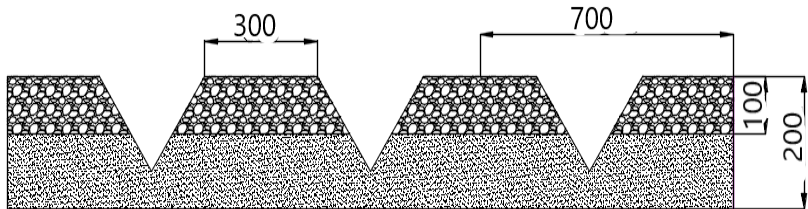
Geleneksel toprak işlemede kullanılan aletlerinin bazı özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Toprak işleme aletlerinin bazı teknik özellikler.

Kulaklı pulluk	Kulak Tipi	Yarı bükük
	Gövde Sayısı (adet)	5
	Çatı Yüksekliği (cm)	68
	Gövdeler Arası Uzaklık (cm)	70
	İş Genişliği (cm)	25.5
	İş Derinliği (cm)	24
	Ağırlık (Kg)	620
Diskaro	Disk Çapı (cm)	610 X 5
	İş Genişliği (cm)	234
	Disk sayısı (adet)	22
	Ağırlık (kg)	1740

Killi toprak şartlarında toprak işlemenin oldukça zor olması ve nem ile birlikte toprakta sırt oluşturmak oldukça zordur. Bozulmadan kalabilecek sırt profili için, sırtlar sıra arası 700 mm, sırt üstü genişliği 350-400 mm, sırt yüksekliği 150-200 mm ve kenar açısı 45° olacak şekilde düzenlenmiştir.

Ön denemelerde 150-200 mm arasında olan toprak işleme derinliği frezelerin toprak ile tıkanması ve otların rotora sarılması nedeniyle işleme derinliği 100 mm olarak uygulanmıştır (Şekil 2). Bu derinlik tohum yatağı hazırlığı için uygun görülmüştür.



Şekil 2. Oluşturulan toprak sırtı

Bu sırtı oluşturabilmek için Şekil 3’te görülen yeni bir lister tasarlanmıştır.



Şekil 3. Denemede kullanılan lister

Sırt üzerini işleyebilmek için ise, bir araçapa makinası toprak frezesi olacak şekilde modifiye edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Araçapa frezesinin rotoru

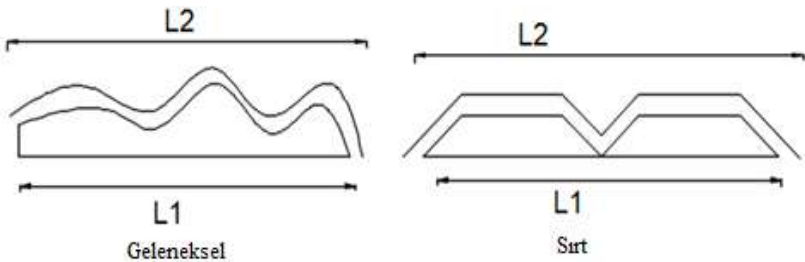
Araçapa frezesi 4 sırayı işleyecek hale getirilmiştir. Bunun için 380 mm uzunluğunda rotor imal edilmiştir. Sıra arası 700 mm’ye denk getirilmiştir. L şeklinli freze bıçakları (Şekil 5), toprağın tıkanmasını önlemek amacıyla 180° açıyla sağlı sollu karşılıklı olacak şekilde kesme genişliğini artırabilmek için 2’li olarak flanşa bağlanmıştır.

Flanşlara bağlanan bıçaklar 10° boşluk açısı ve 90° açıyla bükülerek 40 mm kesme genişliğinde olacak şekilde imal edilmiştir. Bıçaklar 21° 'lik açıyla bilenerek şekil verilmiştir. Bıçaklar, darbe sönümlemesi ve dayanıklı olması için, hardox 450'den 5 mm kalınlıkta malzemeden üretilmiştir. Her flanşa toplam 4 adet bıçak heliksel olarak monte edilmiştir. Toplamda her sırt üzerinde 12 adet bıçak, toprak parçalamak için kullanılmıştır.



Şekil 5. Freze bıçakları

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi zincir yöntemi kullanılmıştır (Şekil 6). Denemede 1000 mm uzunluğunda ve 28.75mm hatvesi olan zincir kullanılmıştır. Ölçümler homojen dağılımı sağlamak için bir sıra boyunca sürekli olacak alınmıştır. Denemelerde yüzey düzgünlüğünü belirlemek için hem toprak işleme yönüne dik hem de toprak işleme yönüne paralel ölçümler yapılmıştır.



Şekil 6. Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi

Toprak yüzey pürüzlülüğü değerleri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Saleh 1993).

$$R = \left(1 - \left(\frac{L_2}{L_1} \right) \right) * 100$$

Burada;

R: Yüzey pürüzlülüğü (%),

L₁: Zincir uzunluğu (cm),

L₂: Pürüzlü yüzeydeki zincir uzunluğu (cm)'dur.

Parça boyut dağılımı değerlerinin belirlenmesi için toprak işlemeden önce ve toprak işlemeden sonra alınan toprak örnekleri kurutulmuş, daha sonra elek yöntemi kullanılarak parçacık boyutları tespit edilmiştir. Toprağın parçalanma durumunu belirlemek için titreşimli elek seti ile elenerek 7 farklı dağılıma ayrılmıştır (Keçecioğlu, 1967). Her bir dağılımdaki topraklar 0.01 g hassasiyetinde hassas terazi kullanılarak tartılmış ve parça boyut dağılımı yüzde olarak belirlenmiştir.

Optimum tohum yatağının hazırlanması, ekim makinasının düzgün çalışması ve tohum çimlenmesi açısından değerlendirildiğinde genel olarak toprak parçalarının 10 mm'den küçük parçacıklardan oluşması gerekmektedir (Dursun, 2015). Bu amaçla; elde edilen 7 dağılım (<1, 1-2, 2-4, 4-6.3, 6.3-8, 10-50, >50 mm) daha sonra <1 mm, 1<x<10 mm, 10<x<50 mm ve >50 mm olarak 4 gruba ayrılmıştır.

2. BULGULAR ve TARTIŞMA

Toprak işleme öncesi ve sonrasında toprak özelliklerinin değişimi tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneme alanı toprağının önemli bazı fiziksel özellikleri (0-10 cm).

	Geleneksel toprak işleme		Lister-araçapa frezesi	
	İşleme öncesi	İşleme sonrası	İşleme öncesi	İşleme sonrası
Nem (%)	35.5	30.1	35.5	32.4
Hacim (g cm ⁻³)	1.21	1.14	1.21	1.20
Porozite (%)	54.12	56.98	54.12	54.71
Penetrasyon direnci (MPa)	0.6	0.41	0.6	0.31

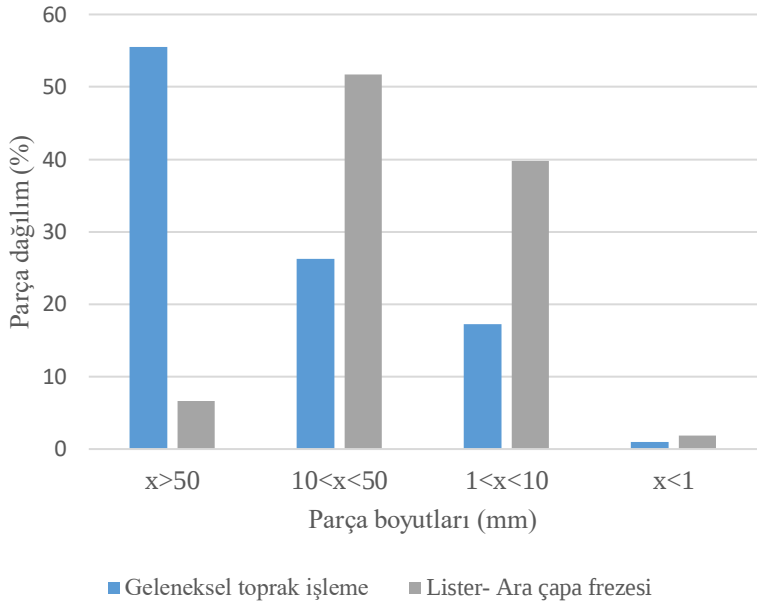
Toprak işlemeden sonra nem, hacim ağırlığı ve penetrasyon direncinde azalmalar görülürken, porozitede artış görülmüştür.

Ekimden sonra alınan toprak parça dağılım değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Parça boyut dağılım değişimi.

Parça çap aralığı (mm)	x>50	10<x<50	1<x< 10	1<x
Geleneksel toprak işleme	55.49 b	26.24 b	17.28b	0.98a
Lister – araçapa frezesi	6.62 a	51.7 a	39.75a	1.83a

Parça boyut dağılımları arasındaki fark istatistiki olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). Geleneksel toprak işlemede parça boyutlarının 50 mm'den büyük olanlarının dağılımı %55.49 olmuş, lister-araçapa kombinasyonu ise %6.62'yi geçememiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Toprak parça dağılımı (%)

10-50 mm arasındaki parça dağılımı geleneksel toprak işlemede %26.24 değerine, lister–araçapa kombinasyonunda ise %51.7 değerine ulaşmıştır. 1-10 mm aralığındaki parça dağılım değerlerinin geleneksel toprak işlemede %17.28 lister–araçapa kombinasyonunda ise %39.75 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 1 mm’nin altında kalan parça dağılım değerleri her iki yöntemde de %3.40’ı geçememiştir. Bitki gelişimi için uygun olarak tanımlanan parça dağılımı (1-50 mm) lister–araçapa kombinasyonu %91.45 ve geleneksel toprak işlemede %43.52 olarak elde edilmiştir. Bu parçalanma değeri toprakta bitki gelişimi için istenilen değere yaklaşmış (Dursun, 2015) ve geleneksel toprak işlemeye göre yaklaşık iki katı daha fazla değer ulaşmıştır.

Çalışmamızda 10 mm’nin altındaki parçalama oranı Kasap (2023)’ın çalışmasında verilen değerlerden daha yüksektir. Aşık, (2015) 20 mm’nin altındaki toprak parça dağılımı değerlerini, azaltılmış toprak işlemede %71.24 olarak belirlemiştir. Pınar vd. (1992) çalışmalarında 8 mm’nin altındaki toprak parça dağılımını geleneksel ekim için %13.55 ve frezeli toprak işleme uygulaması için %15.3 olarak bildirmişlerdir. Bu değerlerin çalışmamızdan daha düşük olduğu

görülmüştür. Çalışmamızda, geleneksel toprak işlemede toprağın yeterince parçalanamadığı söylenebilir.

Geleneksel toprak işlemede ile lister–araçapa kombinasyonunda toprak yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki fark toprak işlemeye dik yönde önemli bulunurken, toprak işleme paralel yönde önemsiz bulunmuştur (Tablo 5).

Tablo 5. Toprak pürüzlülük değerleri

	Toprak işleme yönüne dik (%)	Toprak işleme yönüne paralel (%)
Geleneksel toprak işleme	21.25 b	10.5
Sırt toprak işleme	7.00 a	9.90

Geleneksel toprak işlemede pürüzlülük değerleri toprak işlemeye dik yönde %14-27, toprak işlemeye paralel yönde %0-10 arasında değiştiği görülmüştür. Lister–araçapa kombinasyonunda toprak işleme yönüne dik yönde %2-13 arasında, paralel yönde ise %2-17 arasında değişmiştir.

Toprak işleme yönüne dik pürüzlülük değerlerinin toprak işleme yönüne paralel değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Geleneksel işleme metodunda bu değerlerin yüksek çıkmasının sebebi toprak yapısı ve kulaklı pulluğun toprağı devirirken bir tarafa devirmesiyle büyük kesekler oluşturmaktadır. Lister devrilen kesekleri kestiği için daha da küçülmesini sağlamıştır.

Killi topraklarda yapılan bir çalışmada, farklı işleme yöntemleri arasında en düşük toprak pürüzlülüğü değerleri, frezeli toprak işleme uygulamalarında belirlemişlerdir (Tekgüler ve Selvi, 2011). Altıkat ve Çelik (2013) tınlı toprakta yaptıkları çalışmalarında, geleneksel ve toprak frezesi kullanılan uygulamalarında toprak işlemeye dik ve paralel yönlerde belirledikleri toprak pürüzlülüğü değerlerinin bulduğumuz değerlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Tınlı toprakta azaltılmış toprak işlemede yüzey pürüzlülüğü değerleri çalışmamızda belirlediğimiz değerlerden daha düşüktür (Kuş, 2017).

Yakıt tüketimi değerleri geleneksel toprak işleme için 12.21 L da⁻¹ ve lister-ara çapa frezesi kombinasyonu ile ekimde ise 5.26 L da⁻¹ olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel toprak işleme lister-ara çapa frezesi

kombinasyonu 2.32 kat daha fazla yakıt tüketilmiştir. Aykanat (2009) 2 goble, sırt listeri, sırt tapanı ve sırt ekim makinası kullanarak yaptığı sırta ekim çalışmasında, 6.25 L da⁻¹ yakıt tüketimi ve 0.39 h da⁻¹ çalışma süre olduğunu bildirmiştir. Bizim çalışmamızda protototip makina ile yapılan sırta ekimde, Aykanat (2009)'ın çalışmasına göre 0.99 L da⁻¹ kazanç sağlamıştır.

Ortalama çalışma süresi, geleneksel toprak işleme için 0.48 h da⁻¹ ve lister-araçapa frezesi kombinasyonu ise 0.21 h da⁻¹ olmuştur. Geleneksel toprak işleme göre lister-ara çapa frezesi kombinasyonu ile %56.25 zaman kazanımı olduğu belirlenmiştir. Bizim çalışmamızda Aykanat (2009)'ın çalışmasına göre 0.09 h da⁻¹'lik zaman kazanımı söz konusudur.

Tablo 2.1. Yakıt tüketimi ve Zaman etüdü

Uygulamalar	Kullanılan alet ve makina	İşlem Sayısı	Yakıt Tüketimi (L da ⁻¹)	Zaman etüdü (h da ⁻¹)
Geleneksel toprak işleme	Pulluk	1	9.87	0.21
	Diskaro	3	2.34 (0,78x3)	0.27
Toplam			12.21b	0,48b
Lister-ara çapa kombinasyonu	Lister -ara çapa	1	5.26 a	0.21a

3. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışmada toprak yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için tasarlanan bir kombinasyon kullanılmıştır. Bu kombinasyon ile yüzey pürüzlülüğü geleneksel metoda göre azaltılmıştır. Bu kombinasyon ile toprak kesekleri de daha küçük parçalara ayrılabilmiştir. Geleneksel toprak işleme, lister-ara çapa frezesi kombinasyonuna göre, daha büyük agregatlar, dik yönde yüksek pürüzlülük oranı, yüksek penetrasyon direnci ve daha küçük porozite değerleri elde edilmiştir. Killi ve nemli topraklarda uygun tohum yatağı hazırlığının, sürdürülebilir ve

ekonomik olabilmesi için lister ve ara çapa frezeli toprak işleminin daha uygun olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Allmaras, R.R., Burwell, R.E., Larson, W.E., Holt, R.F., (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation, Research Report no. 7. U.S. Government Printing Office, Washington, DC*, pp. 1–22.
- Altıkat, S., & Çelik, A. (2011). Farklı tip gömücü ayak ve kapatma düzenine sahip doğrudan ekim makinalarının farklı ilerleme hızlarında kullanılmasının toprak yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 1(1), 91-96.
- Aşık, K. (2015). Söke ovasında II. ürün pamukta toprak işleme, ekim ve dikim yöntemlerinin bazı toprak ve bitki özellikleri üzerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi. Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı*, 90, Aydın.
- Aykanat, S. (2009). Buğday tarımında farklı toprak işleme ve ekim yöntemlerinin teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı*, 79. Adana.
- Bennicelli, R.P., St e Pniewski, W., Zakrzhevsky, D.A., (1998). The effect of soil aeration on superoxide dismutase activity, malondialdehyde level, pigment content and stomatal diffusive resistance in maize seedlings. *Environ. Exp. Bot.* 39, 203–211.
- Bjarne, H., Schjonning, P., Sibbesen, E., (1999). Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil Tillage Res.* 52, 103–111.

- Burwell, R. E , R. R. Allmaras and L. L. Sloneker. (1966). Structural alteration of soil surfaces by tillage and rainfall. *J. Soil and Water Conserv.* 21(2):61-63.
- Burwell, R. E, R. R. Allmaras and M. Amemiya. (1963). A field measurement of total porosity and surface microrelief of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 27(6): 697-700.
- Carman, K. (1997). Effect of different tillage systems on soil properties and wheat yield in Middle Anatolia. *Soil and Tillage Research*, 40(3-4), 201-207.
- Çelik, S. A. A. (2013). Toprak yüzey pürüzlülüğü ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10(2), 104-109.
- Darboux, F., Huang, C.H., (2003). An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 92–99.
- Dursun İ. (2015). *Toprak İşleme Alet ve Makinaları*. Ankara üniversitesi. Yayın no:1614. Ankara.
- Govers, G., Takken, I., Helming, K., (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie* 20, 131–146.
- Hansen, B., Schjønning, P., Sibbesen, E., (1999). Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces. *Soil Tillage Res.* 52, 103–111.
- Huang, C. H.,(1998). Quantification of soil microtopography and surface roughness. Fractals in soil science. In: Baveye, Philippe, Parlange, Jean Yves, Stewart, Bobby A.(Eds.), *Advances in Soil Science*. CRC.

- Huang, C.H., Whita, I., Thwaite, E.G., Bendeli, A., (1988). A non contact laser system for measuring soil surface topography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 350–355.
- Kamphorst, E.C., Jetten, V., Guerif, J., Pitkanen, J., Iversen, B.V., Douglas, J.T., Paz, A., (2000). Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1749–1758.
- Kasap, A. (2023). Nohut (*Cicer arietinum* L.) Tarımında farklı toprak işleme yöntemlerinin karşılaştırılması. Doktora Tezi. *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı*, 89, Ankara.
- Keçecioğlu, G. (1967). Toprak Kanalında Çeşitli Toprak işleme Aletleri Üzerinde Bir Araştırma. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, (93).
- Kehl, M., Everding, C., Bostschek, J., Skowronek, A., 2005. Erosion process and erodibility of cultivated soils in North Rhine-Westphalia under artificial rain: I. Site characteristics and result of laboratory experiments. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 34–44.
- Kuipers, H., 1957. A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci.*, 5: 255-262.
- Kuş, E., ve Yıldırım, Y. (2017). Geleneksel ve azaltılmış toprak işleme şartlarına bağlı olarak bazı toprak özelliklerinin belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(4), 51-61.
- Lampurlanes, J., Cantero-Martinez, C., 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil Tillage Res.*, 84, 13-26.

- Merrill, S.D., Huang, C.H., Zobeck, T.M., Tanaka, D.L., 2001. Use of the chain set for scalesensitive and erosion relevant measurement of soil surface roughness. In: Stott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C. (Eds.), *Sustaining the Global Farm*, pp. 594–600.
- Moreno, G. R., Saa Requejo, A., Tarquis Alonso, A.M., Barrington, S., Diaz Alvarez, M.C, 2008. Shadow analysis: a method for measuring soil surface roughness. *Journal of Geoderma*. 146 (1) 201-208.
- Mwendera, E.J., Feyen, J., 1993. Predicting tillage effects on infiltration. *Soil Sci*. 155, 229–235.
- Oelze, M.L., Sabatier, J.M., Raspect, R., 2003. Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 241–250.
- Pınar, Y., Uzun, Z., Onuk, V., Bat, N.K., ve Tekgüler, A. (1992). “Tohum yatağı hazırlama yöntemlerinin toprağın bazı fiziksel özelliklerine etkileri.” 14. *Tarımsal mekanizasyon kongresi bildiri kitabı. Samsun.*
- Podmore, T. H. and L. E Huggins. 1980. Surface roughness effects on overland flow. *Transactions of the ASAE* 23(6): 1434-1439,1445.
- Romkens, M.J.M., and Wang, J.Y., 1986. Effect of tillage on surface roughness. *Transactions of ASAE* 29(2): 429-433.
- Saleh, A., 1993. Soil roughness measurement, chain method. *Journal of Soil and Water Conservation* 48: 527-529.

- Tekgüler A. ve Selvi, K.Ç. (2011). Farklı toprak işleme aletleri i toprak yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(3), 188-193.
- Topakçı M., Ünal İ., Karayel D. Ve Akıncı İ. Görüntü İşleme Yöntemi Kullanılarak Toprak Yüzey Düzgünlüğünün Belirlenmesi. 26. *Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi*, 22–23 Eylül 2010, Hatay.
- Wagner, W.S., 1995. mapping a three-dimensional soil surface with handheld 35 mm photography. *Soil Tillage Res.* 34, 187–197.
- Zribi, M., Ciarletti, V., Taconet, O., Paillé, J., Boissard, P., 2000. Characterization of the soil structure and microwave backscattering based on numerical threedimensional surface representation: analysis with a fractional Brownian model. *Remote Sens. Environ.* 72, 159–169.

BÖLÜM 3

ANTEPFISTIĞI (PİSTACIA VERA L.) BAHÇELERİNDE TOPRAK İŞLEME YÖNTEMLERİ: UYGULAMALAR, ETKİLER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YAKLAŞIMLARI¹

Hasan Cem BİLİM*

Ümran ATAY

Refik POLAT

GİRİŞ

Günümüzde bitkisel üretim sistemlerinde, birim alandan yüksek verim elde etme hedefi sadece üretim odaklı değil; aynı zamanda doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve çevresel etkilerin azaltılması perspektifiyle ele alınmaktadır. Tarımsal faaliyetlerin yoğun olarak yürütüldüğü gıda, yem, lif ve biyoyakıt üretimi gibi alanlarda hava, su ve toprak kaynaklarının korunması giderek daha öncelikli bir hedef haline gelmiştir (Stott ve ark., 2010). Bu bağlamda, toprak işleme uygulamalarının yalnızca kısa vadeli verim artışı sağlaması değil, aynı zamanda toprak sağlığını koruyup ekosistem işlevlerinin uzun vadede devamını güvence altına alacak şekilde planlanması ve uygulanması zorunlu hale gelmiştir.

Toprak, yalnızca bitkisel üretim için bir zemin olmakla kalmayıp; aynı zamanda karbon depolama, su döngüsünün düzenlenmesi,

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

besin maddelerinin döngüsü ve biyolojik çeşitlilik gibi temel ekosistem hizmetlerini sağlayan karmaşık ve dinamik bir sistemdir. Bu nedenle, tarımsal müdahaleler toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerinde doğrudan veya dolaylı etkiler yaratır. Derpsch ve Moriya (1998), uygun olmayan toprak işleme yöntemlerinin toprak yapısında fiziksel bozulmalara, organik madde kaybına ve mikrobiyal aktivite azalmasına neden olarak toprağın temel işlevlerini zayıflattığını ifade etmiştir.

Tarihsel olarak toprak işleme, iyi bir tohum yatağı oluşturmak, yabancı ot kontrolü sağlamak ve gübre gibi girdilerin toprakla homojen karışımını sağlamak amacıyla yapılmıştır. Ancak doğal ekosistemlerin tarıma açılmasıyla başlayan bu uygulamalar, toprakta biriken organik maddelerin hızla ayrışmasına yol açmış; başlangıçta verim artışı sağlamasına rağmen uzun vadede organik madde düzeyinin düşmesi, agregat yapısının bozulması ve erozyonun artmasına neden olmuştur (Papendick ve Parr, 1997). Bu durum, toprak sağlığının ve verimliliğinin sürdürülebilirliği açısından önemli tehditler oluşturmaktadır.

Son yıllarda toprak kalitesi kavramı yalnızca üretkenlik kriterleriyle değil, çevresel sürdürülebilirlik, insan sağlığı ve ekosistem işlevlerinin devamlılığıyla da ilişkilendirilmektedir. Bone ve arkadaşları (2010), insan kaynaklı toprak bozunmasının toprak kalitesini olumsuz etkilediğine dikkat çekmiş; bu nedenle tarımsal yönetim uygulamalarının toprak kalitesi değerlendirmelerinde ayrıntılı şekilde ele alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Benzer şekilde, Kibblewhite ve arkadaşları (2008), toprak sağlığını sürdürülebilir

tarımın temel taşı olarak tanımlamış ve zamanla bu kavramın toprak kalitesi ile eşanlamlı hale geldiğini belirtmişlerdir. Toprak kalitesi, toprağın üretkenliğini sürdürme kapasitesi ile çevresel işlevlerini dengeli biçimde destekleme yeteneğini ifade eder.

Toprak kalitesi, bağımsız bir bilim dalı olmayıp, toprağın yönetim kararlarında kullanılabilecek kapsamlı bir değerlendirme aracıdır (Wander & Drinkwater, 2000). Bu kapsamda, toprak kalitesinin değerlendirilmesi fiziksel (toprak yapısı, su tutma kapasitesi, agregat stabilitesi), kimyasal (pH, besin elementi düzeyi, organik madde içeriği) ve biyolojik (mikrobiyal biyokütle, toprak solucanları, enzim aktiviteleri) parametrelerin bir arada analiz edilmesini gerektirir (Mijangos ve ark., 2006; Paz-Ferreiro ve ark., 2009). Altıkat ve Çelik (2009) tarafından yapılan çalışmalarda, farklı toprak işleme sistemlerinin toprak sıcaklığı, nem içeriği, agregat stabilitesi ve besin elementleri dağılımını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle biyolojik özelliklerin yoğun toprak işleme ile hızla olumsuz etkilenmesi, bu göstergelerin toprak işleme değerlendirmesinde kritik bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, toprak işleme yöntemlerinin değerlendirilmesinde tekil parametrelerden ziyade çok boyutlu bir toprak kalitesi yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir.

Toprak kalitesi indeksleri, tarımsal uygulamaların toprak fonksiyonları üzerindeki etkilerinin nicel olarak ortaya konmasında önemli araçlardır. Karlen ve Stott (1994) tarafından geliştirilen toprak kalite indeksi, toprağın üretkenlik, çevresel sağlık ve biyolojik işlevler açısından bütüncül değerlendirilmesini sağlar. Bezdicak ve arkadaşları (1996) ise ideal bir toprak kalite indeksinin, toprak yönetiminde sadece

verim artışını değil; aynı zamanda çevresel koruma ilkelerini de göz önünde bulundurması gerektiğine dikkat çekmiştir. Bu çerçevede, Toprak Koşullandırma İndeksi (TKİ), Cornell Toprak Sağlığı Testi, Tarımsal Ekosistem Değerlendirme Aracı (TEDA) ve Toprak Amenajmanı Değerlendirme Çerçevesi (TADÇ) gibi araçlar farklı tarımsal ekosistemlerde sürdürülebilirlik ve karşılaştırmalı analizler için kullanılmaktadır (Karlen ve ark., 2008). Örneğin, Nakajima ve arkadaşlarının (2015) Japonya’da gerçekleştirdiği çalışmada, toprak kalite indekslerinin tarımsal ekosistemlerin durumunu objektif olarak belirlemede etkili olduğu görülmüştür.

Antepfıstığı (*Pistacia vera* L.) yetiştiriciliği, özellikle Akdeniz ikliminde yer alan ve ekonomik değeri yüksek uzun ömürlü ağaç bahçelerinde, toprak işleme yöntemlerinin toprak kalitesi üzerindeki etkilerinin ayrıntılı incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Antepfıstığı bahçelerinde uygulanan toprak işleme teknikleri, toprakta fiziksel yapının korunması, organik madde seviyesinin sürdürülmesi ve biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi açısından farklı sonuçlar vermektedir. Örneğin, Karaca (2013) tarafından yürütülen çalışmada, minimum toprak işleme ve koruyucu uygulamaların toprak erozyonunu azaltarak su tutma kapasitesini artırdığı ve mikrobiyal aktiviteyi desteklediği rapor edilmiştir. Ayrıca, toprak işleme sıklığı ve derinliği arttıkça toprak organik maddesi ve biyolojik aktivitenin azaldığı gözlenmiş; bu durum üretim performansını olumsuz etkileyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir.

Lal (2004) tarafından vurgulandığı üzere, toprak organik maddesi karbon depolama kapasitesi ve su tutma potansiyeli gibi birçok kritik

toprak fonksiyonunu belirlemektedir. Bu nedenle, antepfıstığı bahçelerinde sürdürülebilir üretim için organik madde seviyesinin korunması öncelikli olmalıdır. Buna ek olarak, toprak biyolojisi özellikle solucan popülasyonu, mikrobiyal biyokütle ve enzim aktiviteleri gibi göstergeler, toprak sağlığının erken uyarı sistemleri olarak kabul edilmektedir (Mijangos ve ark., 2006). Bu biyolojik göstergelerin korunması, toprak işleme yöntemlerinin agroekolojik direnç ve hastalık baskısı azaltma yönünden önemini artırmaktadır.

Sonuç olarak, antepfıstığı bahçelerinde toprak işleme stratejileri, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini bütüncül olarak dikkate alacak şekilde planlanmalıdır. Minimum toprak işleme, koruyucu örtü bitkileri kullanımı ve organik madde katkıları ile desteklenen entegre toprak yönetim yaklaşımları, hem üretkenliği artırmak hem de toprak sağlığını koruyarak sürdürülebilirliği sağlamak açısından önemlidir. Ayrıca, toprak kalitesi indeksleri ve kapsamlı değerlendirme sistemlerinin düzenli kullanımı, bahçe yönetiminde etkin karar alma süreçlerine ışık tutacaktır. Gelecekte yapılacak saha çalışmaları ve yerel koşullara özgü modellerle bu stratejilerin optimize edilmesi, antepfıstığı üretiminde hem ekonomik hem de çevresel açıdan kalıcı çözümler sunacaktır.

Bu çalışmada, toprak işleme yöntemlerinin toprak kalitesi göstergesi olan toprak özellikleri üzerine etkileri üzerinde durulmuştur.

1.1. Toprak İşleme Stratejileri ve Fiziksel Toprak Özellikleri

Antepfıstığı yetiştiriciliğinde kullanılan toprak işleme yöntemleri, toprağın fiziksel özellikleri üzerinde belirgin değişikliklere yol açar. Bu

fiziksel özellikler arasında toprak hava geçirgenliği, su tutma kapasitesi, agregat stabilitesi ve erozyon direnci öne çıkar (Altıkat ve Çelik, 2009). Toprak işleme, özellikle toprağın fiziksel yapısını iyileştirmede kritik rol oynasa da, yöntem ve yoğunluğuna bağlı olarak uzun vadede toprak sağlığı üzerinde farklı etkiler oluşturabilir.

Geleneksel derin toprak işleme (disk sürümü, pulluk kullanımı gibi) genellikle toprak yüzeyini gevşeterek kısa vadede kök gelişimini kolaylaştırır ve su infiltrasyonunu artırır (Papendick ve Parr, 1997). Ancak bu uygulamalar, toprak organik maddesinin hızla ayrışmasına neden olur, toprak yüzeyinde koruyucu bitki örtüsünü yok eder ve dolayısıyla erozyon riskini artırır (Lal, 2004). Ayrıca, aşırı toprak işleme sonucunda toprak yüzeyinde katmanlaşma (plaklaşma) oluşabilir, bu da su hareketini ve kök penetrasyonunu engelleyerek uzun vadede toprak yapısının bozulmasına yol açar (Derpsch ve Moriya, 1998).

Buna karşılık minimum toprak işleme (minimum tillage) ve koruyucu toprak işleme (conservation tillage) teknikleri, toprağın doğal yapısının korunmasını destekleyerek fiziksel toprak özelliklerinin iyileştirilmesinde daha sürdürülebilir sonuçlar verir (Hobbs ve ark., 2008). Minimum toprak işleme, toprağı sadece bitki ekimi için gerekli olan ölçüde işleyerek toprak yüzeyindeki organik maddeyi ve mikroorganizmaları korur. Bu yöntem, toprak yüzeyinde organik madde birikimini artırır, böylece agregatların stabilitesini güçlendirir ve su tutma kapasitesini yükseltir (Paz-Ferreiro ve ark., 2009). Ayrıca, bu uygulamalar toprak yüzeyinin kaplanmasını sağlar ve suyun toprak

içine infiltre olmasını kolaylaştırarak erozyonun azalmasına katkıda bulunur (Karlen ve ark., 2008).

Araştırmalar, minimum toprak işleme ile uygulanan tarım sistemlerinde toprak hava geçirgenliğinin arttığını ve toprağın su tutma kapasitesinin önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir (Mijangos ve ark., 2006). Bu iyileşmeler, özellikle Akdeniz ikliminde kuraklık stresinin sık yaşandığı antepfıstığı bahçeleri için büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, toprak işleme sıklığının azaltılması, toprakta mikrobiyal aktivitenin ve biyolojik çeşitliliğin korunmasına yardımcı olarak toprağın doğal yapısını destekler (Karaca, 2013).

Toprak işleme yöntemlerinin, toprak yapısına etkilerini değerlendirirken erozyon direnci önemli bir parametredir. Derin ve yoğun toprak işleme uygulamaları, yüzeyde bitki kalıntılarının ve organik madde miktarının azalmasına neden olarak, toprak parçacıklarının su ve rüzgar etkisiyle taşınmasını kolaylaştırır. Buna karşın koruyucu toprak işleme, toprak yüzeyinin bitki kalıntıları ile kaplanması sayesinde erozyon riskini azaltır (Stott ve ark., 2010). Bu durum, toprağın uzun vadede üretkenliğini ve verimliliğini doğrudan olumlu yönde etkiler.

Sonuç olarak, antepfıstığı yetiştiriciliğinde sürdürülebilir toprak yönetimi için minimum ve koruyucu toprak işleme yöntemlerinin benimsenmesi, hem toprak fiziksel özelliklerinin korunması hem de su kaynaklarının etkin kullanımı açısından önem taşımaktadır. Bu stratejiler, toprak yapısını iyileştirirken erozyonu engeller ve organik madde kaybını minimize ederek uzun vadeli verimliliğe katkı sağlar.

1.2. Kimyasal Toprak Özelliklerine Etkileri

Toprak işleme uygulamaları, toprağın kimyasal özellikleri üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Bunlar arasında toprak pH'sı, besin elementlerinin miktarı ve dağılımı ile organik madde düzeyleri öncelikli olarak dikkati çekmektedir. Yoğun ve sürekli toprak işleme, toprakta bulunan organik karbonun hızla parçalanmasına yol açarak kısa vadede besin elementlerinin mobilitesini ve bitki erişilebilirliğini artırabilir (Karlen ve Stott, 1994). Ancak bu süreç uzun vadede toprak organik maddesinin azalmasına, besin elementlerinin dengesizleşmesine ve dolayısıyla toprak verimliliğinde gerilemeye sebep olabilir (Paz-Ferreiro ve ark., 2009).

Organik madde, toprak kimyasının temel belirleyicilerinden biridir ve toprak yapısını iyileştirmenin yanı sıra, bitki besin elementlerinin tutulması ve yavaş salınımını sağlar. Bu sayede toprak, asitlik ve alkalilik dalgalanmalarına karşı tampon kapasitesine kavuşur (Kacar ve Katkat, 2015). Antepfıstığı (*Pistacia vera* L.) bahçelerinde, organik madde içeriğinin korunması özellikle önemlidir; çünkü bu uzun ömürlü bitkilerin besin elementlerine sürekli ve dengeli erişimi hem verim hem de kalite açısından belirleyici rol oynar (Karaca, 2013). Ayrıca, toprak işleme sıklığının artırılması organik madde kaybını hızlandırırken, azot, fosfor ve potasyum gibi makro besin elementlerinin de toprakta tutunma kapasitesini olumsuz etkileyebilir (Derpsch ve Moriya, 1998).

Toprak işleme ile gübre uygulamalarının entegre edilmesi, kimyasal toprak kalitesinin sürdürülebilirliğini sağlamak için kritik bir stratejidir. Toprak işleme, besin maddelerinin toprağa homojen dağılmasını sağlarken, doğru gübreleme uygulamaları ile toprak

kimyasal özellikleri optimize edilebilir (Bone ve ark., 2010). Örneğin, organik gübrelerin kullanımı, toprak organik madde miktarını artırarak pH düzenlemesinde ve besin elementlerinin tutulmasında önemli rol oynar. Ayrıca, mineral gübrelerin kontrollü uygulanması, toprak kimyasal özelliklerinin bozulmasını önleyebilir (Kibblewhite ve ark., 2008).

Bununla birlikte, bazı araştırmalar toprak işleme şeklinin pH üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Derin toprak işleme, toprağın alt katmanlarındaki farklı pH düzeylerini yüzeye çıkararak pH dalgalanmalarına neden olabilir. Bu durum, özellikle nötr ya da alkali topraklarda bitki besin elementlerinin alımını kısıtlayabilir (Nakajima ve ark., 2015). Minimum toprak işleme ve koruyucu toprak işleme teknikleri ise toprağın kimyasal dengesinin korunmasına ve pH dalgalanmalarının azaltılmasına katkıda bulunur (Altıkat ve Çelik, 2009).

Sonuç olarak, antepfıstığı yetiştiriciliğinde toprak işleme yöntemlerinin kimyasal toprak özellikleri üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirilmelidir. Toprak pH'sı, besin elementi içeriği ve organik madde düzeyi gibi parametrelerin sürdürülebilir biçimde korunması, hem bitki sağlığı hem de uzun vadeli üretim verimliliği için hayati önem taşır. Bu bağlamda, toprak işleme ile gübreleme uygulamalarının dengeli entegrasyonu, toprak kimyasının korunmasını ve geliştirilmesini sağlayacak en etkili yaklaşımlardan biridir.

1.3. Biyolojik Toprak Özellikleri ve Toprak Sağlığı

Toprak biyolojisi, toprak sağlığının ve üretkenliğinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahip bir bileşendir. Toprak mikroorganizmaları, toprak solucanları, mantarlar, bakteriler ve enzim aktiviteleri gibi biyolojik göstergeler, toprak ekosisteminin işleyişini ve toprağın kendini yenileme kapasitesini doğrudan yansıtır (Mijangos ve ark., 2006). Bu göstergeler, organik maddelerin parçalanması, besin döngüsünün düzenlenmesi, toprak yapısının iyileştirilmesi ve patojenlerin kontrolü gibi birçok ekosistem hizmetini sağlar (Bardgett ve van der Putten, 2014).

Toprak işleme yöntemleri, özellikle derin ve sık yapılan işlemler, toprak biyolojisini olumsuz etkileyen başlıca faktörler arasında yer alır. Mekanik işlem sırasında toprak yapısı bozulur ve mikroorganizmaların yaşadığı habitat zarar görür. Bu durum, mikrobiyal biyokütle ve enzim aktivitelerinde önemli azalmalarla kendini gösterir (Bone ve ark., 2010). Özellikle toprak solucanlarının popülasyonu, toprak işleme ile hızla düşer; oysa solucanlar toprak havalanması, organik madde ayrışması ve toprak yapısının stabilizasyonunda merkezi roller üstlenir (Edwards ve Bohlen, 1996). Ayrıca, yoğun toprak işleme, mikrobiyal çeşitlilik üzerinde negatif etkiler yaparak toprağın hastalıklara karşı direncini zayıflatabilir (Kibblewhite ve ark., 2008).

Antepfıstığı yetiştiriciliğinde toprak biyolojisinin korunması, özellikle hastalık ve zararlı organizmalarla biyolojik mücadele açısından önem taşır. Sağlıklı ve biyolojik olarak zengin topraklar, zararlı patojenlerin yayılımını engelleyen doğal dengeyi destekler (Lal, 2004). Toprak işleme teknikleriyle biyolojik aktivitenin korunması,

sürdürülebilir üretim için önemli bir stratejidir. Minimum toprak işleme veya koruyucu toprak işleme yöntemleri, toprak biyolojisinin devamlılığı açısından avantaj sağlar; çünkü bu uygulamalar, mikroorganizma habitatlarını korur, organik maddeyi artırır ve biyolojik çeşitliliği destekler (Six ve ark., 2004).

Bunun yanı sıra, biyolojik toprak göstergelerinin düzenli izlenmesi, toprak sağlığının erken uyarı sistemleri olarak kullanılabilir. Mikrobiyal biyokütle, enzim aktiviteleri (örneğin dehidrogenaz, fosfataz) ve solucan popülasyonu ölçümleri, toprak işleme yöntemlerinin ekolojik etkilerini değerlendirmede güvenilir parametrelerdir (Paz-Ferreiro ve ark., 2009). Bu nedenle, antepfıstığı bahçelerinde uygulanacak toprak işleme stratejilerinin belirlenmesinde biyolojik göstergelerin dikkate alınması, hem verim hem de ekosistem sağlığı açısından kritik öneme sahiptir.

Sonuç olarak, toprak biyolojisinin korunması, agroekosistemlerin sürdürülebilirliği ve çevresel dayanıklılık açısından vazgeçilmezdir. Antepfıstığı yetiştiriciliğinde toprak işleme uygulamalarının biyolojik etkileri, toprağın canlı bileşenlerine zarar vermeden optimize edilmelidir. Böylece, hem üretkenlik hem de doğal biyolojik kontrol mekanizmalarının sürekliliği sağlanabilir.

1.4. Toprak Kalitesi Değerlendirme Yaklaşımları

Toprak kalitesi, bir toprağın bitkisel üretimi destekleme kapasitesi ve aynı zamanda ekosistem hizmetlerini sürdürebilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu kavram, toprakların yalnızca verimliliğini değil, aynı zamanda su tutma kapasitesi, besin elementi döngüsü, erozyona direnç

gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir (Wander & Drinkwater, 2000). Toprak kalitesi, özellikle uzun ömürlü ve ekonomik değeri yüksek olan antepfıstığı bahçeleri gibi agroekosistemlerde, hem üretim hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir parametredir.

Son yıllarda, toprak kalitesini değerlendirmek amacıyla çok parametrelili indeksler geliştirilmiştir. Bu indeksler, toprağın çeşitli özelliklerini bir araya getirerek, tarımsal uygulamaların etkisini kapsamlı biçimde ortaya koyar. Karlen ve Stott (1994) tarafından geliştirilen Toprak Kalite İndeksi (Soil Quality Index - SQI), toprak üretkenliği ile çevresel faktörleri bir arada değerlendiren öncü araçlardan biridir. Bu indeks, fiziksel (örneğin toprak dokusu, su tutma kapasitesi), kimyasal (pH, besin elementleri), biyolojik (mikrobiyal aktivite, organik madde) parametreleri dikkate alarak, toprak sağlığının bütünsel bir resmini sunar.

Bununla birlikte, Tarımsal Ekosistem Değerlendirme Aracı (TEDA) ve Cornell Toprak Sağlığı Testi gibi yöntemler de agroekosistemlerin yönetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Karlen ve ark., 2008). TEDA, tarımsal faaliyetlerin toprak ve çevre üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde analiz ederken, Cornell Toprak Sağlığı Testi toprak biyolojisi, kimyası ve fiziksel durumunu ölçerek daha detaylı ve pratik sonuçlar sağlar (Karlen ve ark., 2008). Bu araçlar, özellikle yerel iklim ve toprak koşullarına uygun sürdürülebilir yönetim kararları alınmasında önemli veri kaynaklarıdır.

Antepfıstığı yetiştiriciliğinde, toprak kalitesi izlemi sayesinde, toprak işleme, gübreleme ve sulama gibi uygulamaların toprağa etkileri

düzenli olarak takip edilerek, olası bozulmalar erken aşamada tespit edilebilir. Böylece, hem üretim verimliliği artırılabilir hem de toprak sağlığı korunabilir (Karaca, 2013). Bu bütüncül yaklaşım, toprağın hem kısa hem de uzun vadede agroekosistem fonksiyonlarını sürdürebilmesini sağlar ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir.

1.5. Antepfıstığı Bahçelerinde Toprak Kalitesi ve İşleme Sistemleri

Gaziantep ve çevresinde yapılan kapsamlı araştırmalar, antepfıstığı yetiştiriciliğinde toprak organik maddesinin kritik bir eksiklik olduğunu ortaya koymuştur. Kalkancı ve arkadaşlarının (2023) saha çalışmalarında, bölgedeki antepfıstığı bahçelerinin yaklaşık %98'inin organik madde bakımından yetersiz olduğu belirlenmiştir. Organik madde açısından fakir topraklar, su tutma kapasitesinin azalması ve mikrobiyal aktivitenin düşmesiyle karakterizedir. Bu durum, bitkilerin su ve besin erişimini zorlaştırarak üretim verimliliğinde azalmaya yol açmaktadır (Lal, 2004; Karaca, 2013). Bu nedenle, agroekosistemlerin sürdürülebilirliği açısından minimum toprak işleme, organik materyal uygulamaları ve yüzeyde bitki artığı bırakmaya dayalı koruyucu yöntemler öncelik kazanmıştır.

Derin toprak işleme teknikleri, kısa vadede suyun alt katmanlara geçişini kolaylaştırarak infiltrasyon kapasitesini artırsa da, uzun vadede toprağın strüktürünü bozarak yüzeyde koruyucu bitki örtüsünün azalmasına ve erozyon riskinin artmasına neden olmaktadır (Papendick ve Parr, 1997). Bozgeyik ve Çimrin (2020) ise koruyucu toprak işleme

sistemlerinin suyun toprakta tutulma süresini uzatarak özellikle kurak dönemlerde antepfıstığı bitkisinin su stresini önlediğini belirtmişlerdir. Bölgenin kurak iklim özellikleri göz önüne alındığında, bu stratejiler su yönetiminde önemli avantaj sağlamaktadır.

Yabancı ot yönetimi açısından yapılan karşılaştırmalı çalışmalar ise farklı toprak işleme sistemlerinin bitki verimi üzerinde anlamlı bir fark yaratmasa da, yabancı ot yoğunluğunu önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bilim ve Korucu (2016) tarafından yürütülen çalışmada, T1 ve T2 koruyucu toprak işleme uygulamalarının yabancı ot baskısını azalttığı ve ekonomik açıdan avantaj sağladığı bulunmuştur. Bu bulgular, toprak işleme stratejilerinin sadece agronomik değil, çevresel ve ekonomik açılardan da bütüncül olarak ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Toprak işleme, esas olarak iyi bir tohum yatağı hazırlamak amacıyla toprak strüktüründe mekanik değişiklikler yapma işlemidir. Ancak toprak işleme yapılırken, ekosistemin kararlılığını bozmayacak ve bitki gelişimini olumsuz etkilemeyecek sistemlerin tercih edilmesi gerekmektedir (Kirişçi ve Korucu, 2001). Yoğun ve sürekli tarımsal işlemler, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısında bozulmalara yol açarak toprak sağlığını olumsuz etkilemektedir (Derpsch ve Moriya, 1998). Toprak işleme sistemleri uygulama amaçlarına göre genel olarak geleneksel ve koruyucu toprak işleme sistemleri olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır (Korucu ve ark., 1998).

Geleneksel toprak işleme, toprağı gevşetme ve bitki kalıntılarını toprağı karıştırma amaçlı uygulamalarla, erozyon riskini artırmakta, toprak organik karbonunu azaltmakta ve toprak yapısını

bozabilmektedir (Gajri ve ark., 2002). Buna karşılık koruyucu toprak işleme sistemleri, toprakta organik madde birikimini desteklerken, tarla trafiğini azaltarak toprak sıkışmasını önlemekte ve yüzeyde daha fazla bitki artığı bırakarak su ve rüzgâr erozyonuna karşı koruma sağlamaktadır (Yalçın ve ark., 2003).

Toprak işleme sistemleri, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik kalite göstergelerini etkileyerek toprak kalitesinde önemli değişimlere neden olmaktadır (Cannell ve Hawes, 1994). Günal ve arkadaşları (2015), toprak verimliliğinin ve diğer ekosistem fonksiyonlarının kaybının temel nedenlerinden birinin, insan aktiviteleriyle toprak dinamiklerinin olumsuz etkilenmesi olduğunu belirtmiştir. Özellikle toprak işleme yoğunluğunun, toprak kalitesini bozan en önemli insan kaynaklı faktörlerden biri olduğunu vurgulayan Karlen ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada kulaklı pulluğun toprak kalitesi göstergeleri üzerinde en büyük olumsuz etkiyi yarattığını ortaya koymuşlardır.

Karlen ve arkadaşları (2008b), bir havza ölçeğinde Tarımsal Ekosistem Değerlendirme Aracı (TADÇ) kullanarak yaptıkları çalışmada, derin toprak işlemenin, azaltılmış toprak işleme yöntemlerine kıyasla toprak kalite indikatörlerini önemli ölçüde olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir. Farklı genetik özelliklere sahip arazilerde uygulanan toprak işleme sistemlerinin, toprak özelliklerinde zamanla bozulma, iyileşme veya stabilite yaratabileceği ve bu değişimlerin toprak kalitesiyle izlenebileceği ifade edilmektedir (Karlen ve ark., 2003) (Şekil 2).

Kısa dönemli toprak işlemenin, toprak keseklerini parçalayıp organik maddeyi toprağa karıştırarak gözenekliliği artırdığı; ancak

uzun dönemli ve yoğun toprak işlemenin, organik madde miktarını azaltarak toprak yapısını olumsuz etkilediği bilinmektedir (USDA-NRCS, 2008). Bu bağlamda toprak işleme sistemlerinin, toprak kalitesi üzerinde zamanla önemli etkileri ortaya çıkmaktadır (Aziz ve ark., 2013).

Karlen ve ark. (1994a), farklı toprak işleme ve ürün artışı yönetim stratejileri altında toprak kalitesini değerlendirirken, agregat dayanıklılığı, penetrasyon direnci, hacim ağırlığı, nem içeriği, mikrobiyal biyokütle, pH, fosfor (P), potasyum (K), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), toplam azot (N) ve toplam karbon (C) gibi parametreleri incelemişlerdir. Bu çalışmada, doğrudan ekim uygulamasının agregat dayanıklılığını, toplam karbonu, mikrobiyal aktiviteyi ve solucan popülasyonunu, kulaklı pulluk ve çizel uygulamalarından daha fazla artırdığı belirlenmiştir.

Askari ve Holden (2015) ise İrlanda'da geleneksel ve minimum toprak işleme sistemlerinin etkilerini inceleyerek, toplam N, toplam C, Mg, agregat boyut dağılımı, hacim ağırlığı, penetrasyon direnci ve toprak solunumu gibi göstergeleri kullanmış ve minimum toprak işlemenin toprak kalitesi üzerinde olumlu ve önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

Imaz ve ark. (2010), geleneksel, minimum ve doğrudan ekim sistemlerinin toprak kalitesi üzerine etkilerini değerlendirirken, agregat stabilitesi, penetrasyon direnci ve organik maddeyi en hassas indikatörler olarak tanımlamışlardır. Organik madde kaybının, toprak işlemenin etkisiyle %1'in altına düşebileceği ve bunun da toprak

kalitesini ciddi şekilde zayıflattığı literatürde geniş şekilde yer almaktadır (Sullivan, 2004; Günel ve ark., 2015).

Chan ve Hulugalle (1999) da yoğun toprak işleme sonrası pulluk tabanı oluşumu, artan asitlik, azalan organik karbon, toplam azot ve agregat stabilitesi nedeniyle toprak kalitesinin bozulduğunu; ancak koruyucu toprak işlemenin organik maddeyi artırarak toprak kimyasını iyileştirdiğini rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Elliot ve Papendick (1986), organik madde içeriğinin artmasıyla humus parçalanmasının hızlandığını ve bunun toprak yapısı ile bitki besin elementi içeriğini olumlu yönde etkilediğini ifade etmiştir (Erşahin, 2001). Wienhold ve Halvorson (1999) ise koruyucu toprak işlemenin azot mineralizasyon oranını artırarak toprak kalitesini iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Toprak kalitesini korumak ve iyileştirmek amacıyla geliştirilen arazi amenajman sistemlerinde toprak işleme minimuma indirilmektedir. Bu kapsamda, doğrudan ekim (no-till) teknikleri yüzeyde bitki artığı bırakarak toprağı erozyona karşı korumada etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Arshad, 1999). Çok sayıda çalışma, toprak işleme yoğunluğunun azalmasının toprak kalitesini iyileştirdiğini ve doğrudan ekim gibi koruyucu sistemlerin biyolojik özellikleri, özellikle solucan popülasyonunu artırdığını ortaya koymuştur (Tebrügge ve Düring, 1999).

Nakajima ve arkadaşları (2015), siltli-tınlı topraklarda yaptıkları çalışmada, toprak işleme ve drenaj sistemlerinin toprak kalitesi üzerindeki etkilerini inceleyerek, hidrolik iletkenlik ve organik karbonun en belirgin kalite indikatörleri olduğunu ve uzun süreli doğrudan ekim ile iyi yüzey drenajının toprak kalitesini koruduğunu

göstermiştir. Özgöz ve ark. (2013) ise doğal mera ile toprak işleme yapılan alanları karşılaştırdıklarında, mera alanlarındaki toprak kalitesinin (%73) işlenen araziye (%71) göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Karlen ve ark. (2013), farklı toprak tekstürlerine sahip arazilerde toprak kalitesinin %82-85 arasında fonksiyon gösterdiğini rapor ederken, Aziz ve ark. (2013) ise 0-7.5 ve 7.5-15 cm derinliklerde geleneksel toprak işleme sistemlerinin toprak kalitesini sırasıyla %60.4 ve %52.1 olarak ölçerken, doğrudan ekim sisteminde bu değerlerin %74.7 ve %64.1 olduğunu tespit etmişlerdir.

Sonuç olarak, Gaziantep ve çevresinde antepfıstığı yetiştiriciliğinde toprak organik maddesinin artırılması ve toprak yapısının korunması amacıyla koruyucu toprak işleme stratejileri vazgeçilmezdir. Bu uygulamalar, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek su yönetimi, erozyon kontrolü ve yabancı ot baskısının azaltılması gibi çok boyutlu faydalar sağlamaktadır. Toprağın aşırı işlenmesi sonucu ortaya çıkan bozulmaların önlenmesi için, geleneksel toprak işleme yöntemlerinin yerine azaltılmış toprak işleme veya doğrudan ekim gibi koruyucu sistemlerin uygulanması önem taşımaktadır.

2. SONUÇ

Gaziantep ve çevresindeki antepfıstığı bahçelerinde yapılan araştırmalar, toprakların büyük ölçüde organik madde yönünden yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Bu eksiklik, toprakların su tutma kapasitesini düşürmekte, mikrobiyal canlılığı azaltmakta ve bitkilerin

besin ve suya erişimini kısıtlamaktadır. Geleneksel derin toprak işleme yöntemleri, kısa vadeli su infiltrasyonunu kolaylaştırırsa da uzun vadede toprak yapısının bozulması, organik madde kaybı ve erozyon riski gibi olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Buna karşılık, minimum toprak işleme ve doğrudan ekim gibi koruyucu işleme teknikleri; toprak organik madde seviyesini yükseltmekte, mikrobiyal aktiviteyi desteklemekte, yabancı ot yoğunluğunu azaltmakta ve suyun daha etkin tutulmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntemlerin hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olduğu görülmektedir. Özellikle fiziksel (agregat stabilitesi, sıkışma direnci), kimyasal (pH, besin elementleri, organik madde) ve biyolojik (mikrobiyal faaliyet, solucan popülasyonu) göstergelere dayalı değerlendirmelerde koruyucu uygulamaların toprak sağlığını iyileştirdiği saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- Altıkat, S., & Çelik, İ./Ö. (2009). Toprak işleme yöntemlerinin toprak özellikleri ve bitki besin elementi dağılımına etkileri. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 15(2/3), 45–134.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Cambardella, C.A. (2002). The soil quality indexing process. *Agronomy Journal*, 94, 91–101.
- Arshad, M.A. (1999). Soil Quality Assessment for Sustainable Land Management. In *Advances in Soil Science* (pp. 117–156). Springer.
- Aziz, I., Günal, H., & Korucu, M.K. (2013). Toprak kalitesi ve toprak işleme sistemleri ilişkisi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 19(2), 45–59.
- Bardgett, R.D., & van der Putten, W.H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511.
- Bezdicsek, D.F., Karlen, D.L., & Andrews, S.S. (1996). Soil quality: A conceptual framework and novel approach to support sustainable agriculture. *Agronomy Journal*, 88(4), 534–540.
- Bilim, H., & Korucu, M.K. (2016). Koruyucu toprak işleme ve yabancı ot yönetimi. *Bitki Koruma Bülteni*, 56(3), 123–130.
- Bone, C., et al. (2010). Impact of agricultural and human activities on soil degradation. *Environmental Science & Technology*, 44(6), 2170–2177 / *Environmental Science and Policy*, 13(8), 703–711.
- Cannell, R.Q., & Hawes, C.R. (1994). Soil quality and soil quality indicators: An overview. *Soil Science*, 158(3), 121–130.

- Chan, K.Y., & Hulugalle, N.R. (1999). Soil quality decline in Australia: Causes and responses. *Australian Journal of Soil Research*, 37(5), 757–771.
- Derpsch, R., & Moriya, K. (1998). Conservation agriculture and tillage effects on soil properties. *Soil & Tillage Research*, 49–66.
- Edwards, C.A., & Bohlen, P.J. (1996). *Biology and Ecology of Earthworms*. Chapman & Hall.
- Elliot, E.T., & Papendick, R.I. (1986). Organic matter and its role in soil structure. In *Soil Organisms and Soil Fertility* (pp. 105–120). Elsevier.
- Erşahin, S. (2001). Toprak organik maddesi ve tarımsal üretime etkisi. *Tarım ve Orman Dergisi*, 12(4), 23–31.
- Gajri, P.R., Arora, V.K., & Sharma, R.C. (2002). Impact of tillage and residue management on soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 66(2), 119–128.
- Günel, H., Korucu, M.K., & Bilim, H. (2015). Toprak bozulması ve toprak kalitesi ilişkisi. *Toprak Bilimi Dergisi*, 21(1), 11–26.
- Hobbs, P.R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363(1492), 543–555.
- Hornick, S.B. (1992). Factors affecting the composition and quality of agricultural products. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2(2), 51–69.
- Imaz, M.J., Aguilera, E., & Martin, A. (2010). Evaluation of soil quality indicators in Mediterranean agroecosystems. *Soil Science*, 175(2), 76–83.

- Karaca, A. (2013). Türkiye'de toprak ve su kaynaklarının korunması. *Türkiye Ziraat Dergisi*, 38(2), 55–70.
- Karaca, A. / Ş. / M. (2013). Antepfıstığı bahçelerinde toprak işleme ve koruyucu uygulamaların etkisi. *Tarım Bilimleri Dergisi / Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi / Tarım ve Orman Bilimleri Dergisi*, 19(2), 45–156.
- Karlen, D.L., et al. (1994–2013). Soil quality: Kavramsal çerçeve, tanımlar ve değerlendirme araçları. *Soil Science Society of America Journal / Agronomy Journal / Agricultural Ecosystem Health*, çeşitli yıllar ve ciltler.
- Kacar, B., & Katkat, V. (2015). *Toprak Kimyası*. Ankara Üniversitesi Yayınları.
- Kalkancı, O., et al. (2023). Antepfıstığı yetiştiriciliğinde toprak organik maddesi ve su yönetimi. *Gaziantep Tarım Araştırmaları*, 12(4), 77–89.
- Kibblewhite, M.G., Ritz, K., & Swift, M.J. (2008). Soil health in agriculture: New perspectives. *Soil Use and Management / Philosophical Transactions B*, 24(1), 4–11 / 685–701.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627.
- Mijangos, I., et al. (2006). Soil microbial biomass and biological indicators under different management. *Agronomy Journal / Applied Soil Ecology*, 98(5), 1175–1180 / 33(2), 140–151.
- Nakajima, K./T., et al. (2015). Soil quality indices and effects of tillage in Japanese agroecosystems. *Soil Science and Plant Nutrition / Soil & Tillage Research*, çeşitli ciltler.

- Özgöz, E., et al. (2013). Tarım arazilerinde toprak kalitesi değerlendirmesi. *Toprak ve Su*, 7(2), 101–112.
- Papendick, R.I., & Parr, J.F. (1997). Soil erosion and conservation tillage: Principles and practices. *Advances in Agronomy / Soil Science Society of America Journal*, çeşitli ciltler.
- Paz-Ferreiro, J., et al. (2009). Soil quality and organic matter dynamics under different tillage systems. *Soil Biology & Biochemistry / Agriculture, Ecosystems & Environment*, çeşitli ciltler.
- Six, J., et al. (2004). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils. *Agronomie*, 24(6), 755–775.
- Stott, D.E., et al. (2010). Soil quality and sustainable land management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1–2), 1–2.
- Sullivan, D.M. (2004). Organic matter and soil quality in agricultural systems. *Agronomy Journal*, 96(4), 1206–1210.
- Tebrügge, F., & Düring, R.-A. (1999). Reducing tillage intensity—a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53(1), 15–28.
- Wander, M.M., & Drinkwater, L.E. (2000). Organic and conventional management effects on soil quality and biological activity. *Soil Science Society of America Journal / Soil Biology and Biochemistry*, çeşitli ciltler.
- Wienhold, B.J., & Halvorson, A.D. (1999). No-till and conventional tillage effects on N mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 63(1), 128–135.
- Yalçın, M., et al. (2003). Koruyucu toprak işleme sistemlerinin erozyon kontrolüne etkileri. *Erozyon Kontrolü Dergisi*, 10(1), 15–24.

BÖLÜM 4

BAĞLARDA ZİRAİ İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI (ZİHA) İLE YAPILAN PESTİSİT UYGULAMALARINDA FARKLI ZİHA VE UYGULAMA PARAMETRELERİNİN DAMLA DAĞILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ¹

Arş. Gör. Hasan Berk ÖZYURT

Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇELEN

Mehmet Efnan KOYUNLU

GİRİŞ

Asma (*Vitis vinifera* L.), ılıman iklim kuşağına uyumlu bir tür olup, dünya genelinde özellikle 30⁰ ve 40⁰ enlemleri arasında yetişebilmektedir (Deliorman vd.,2011). Kesin verilerin alındığı son yıl olan 2023 yılı verilerine göre dünya sofralık üzüm üretimi yaklaşık 28 milyon ton, şaraplık üzüm üretimi 23,7 milyon litre ve kuru üzüm üretimi 1.1 milyon ton olarak açıklanmıştır (Foreign Agricultural Service (FAS), 2023). Türkiye’de aynı yıl toplam 3.4 milyon tonluk üretim ile dünya genelinde beşinci konumdadır. Ülkemizde üzüm; sofralık, şaraplık, kuru ve şıralık olarak yetiştirilmektedir. Türkiye’nin neredeyse her ilinde üzüm yetiştirebiliyor olsa da üretim Ege, Marmara, Akdeniz ve İç Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmıştır (Statagri, 2023). Tüm tarımsal faaliyetlerde olduğu gibi üzüm bağlarında da çeşitli

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

hastalık, zararlı ve yabancı otlarla mücadele yapılması elzemdir. Üzüm bağlarında en sık rastlanan hastalıklar Bağ küllemesi (*Erysiphe/Uncinula necator*) ve Bağ mildiyösü (*Plasmopara viticola*), önemli zararlılar ise Salkım güvesi (*Lobesia botrana*), Bağ pirali (*Sparganothis pilleriana*) ve Unlu bit (*Planococcus citri*) olarak sıralanmaktadır. Bağ alanlarında yaygın görülen yabancı ot türleri arasında Domuz pıtrağı (*Xanthium strumarium L.*), Kırmızı köklü tilkikuyruğu (*Amaranthus retroflexus L.*), Köpek (it) üzümü (*Solanum nigrum*) ve Sirkengiller (*Chenopodium album L.*) bulunmaktadır (Anonim, 2021).

Bu hastalıklar ve zararlılarla geleneksel olarak sırt atövizörleri veya yardımcı hava akımlı bahçe tipi pölvemizatör kullanılmaktadır (Şekil 1).



(a)

(b)

Şekil 1. Radyal fanlı bahçe pölvemizatörü (a) ve tünel tipi bahçe pölvemizatörü (b)

2023 yılı istatistiklerine göre Türkiye’de yaklaşık 139 bin atövizör ve 410 bin kuyruk milinden hareketli pölvemizatör bulunmaktadır (TÜİK, 2023). Bu ekipmanlar özellikle telli terbiye

sistemine sahip bağlarda etkili bir şekilde çalışabilmektedir. Ancak düzensiz aralıklarla dikilmiş, eğimli arazilerde kurulu veya traktör ve pülverizatörün giremeyeceği kadar dar sıra aralıklarına sahip bağlarda bu sistemlerle ilaçlama yapmak çoğu zaman mümkün değildir.

Son yıllarda ise geleneksel uygulamalara alternatif olarak zirai insansız hava araçları (ZİHA) ile yapılan uygulamalar da yaygınlaşmaya başlamıştır. Temel olarak traktörün ve insanın erişemeyeceği eğimli, bataklık veya çamurlu arazilerde pestisit uygulaması yapmak için tasarlanan ZİHA'lar, uygulamaya elverişli tüm arazilerde kullanılabilir. Yine de, ZİHA'lar ile yapılan pestisit uygulamalarının düşük uygulama hacmine sahip olması sebebiyle, hedef yüzeyde düşük pestisit birikimi, üst ve alt yapraklar arasında kaplama farkı ve damla sürüklenmesi gibi sorunlar önemli kısıtlayıcı unsurlar olarak ortaya çıkmaktadır (Önler vd., 2023; Özyurt ve Çelen, 2022). Üzüm bağlarında da özellikle asma kanopisinin en yoğun olduğu evrelerde yapılan uygulamalarda damla penetrasyonun ne kadar iyi olacağı bilinmemektedir.

Bağ alanlarında İHA'larla yapılan ilaçlamalarda optimum damla dağılımını sağlayacak parametrelerin belirlenmesine yönelik çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Biglia vd. (2023), sadece asmaları hedef alacak şekilde tasarlanmış iki farklı meme tipinin performansını karşılaştırmış ancak meme açısının pestisit kayıplarını azaltmada belirleyici olmadığını raporlamıştır. Aynı araştırma grubunun bir başka çalışmasında (Biglia vd., 2022), iki farklı ilaçlama modu, hız ve meme tipinin değerlendirildiği denemelerde, şerit uygulamalarında daha iyi damla birikimi sağlandığı ancak kaplama ve dağılım açısından yardımcı

hava akımlı bahçe pülverizatörünün üstün olduğu belirtilmiştir. Sassu vd. (2024), bağ ilaçlamaları için en uygun İHA çalışma parametrelerinin 2 m uçuş yüksekliği, 1,5 m/s ilerleme hızı ve sıra arası uçuşlar olduğunu bildirmiştir. Wang vd. (2021) ise üç farklı İHA tipi ve iki farklı meme tipinin yapay bağ ortamındaki performansını karşılaştırmış; sürüklenme ve ilaç dağılımı açısından 6 rotorlu İHA'ların en başarılı, helikopter tipi İHA'ların ise en düşük performansa sahip olduğunu belirlemiştir. Morales-Rodriguez (2022) ise ekonomik ve uygulama etkinliği bakımından geleneksel pülverizatörlerin hâlâ daha avantajlı olduğunu, İHA'ların ise hız ve iş verimliliği açısından üstünlük gösterdiğini ifade etmiştir.

Bitki boyunun yüksek ve bitki kanopisinin yoğun olduğu tarım alanlarında yapılan pestisit uygulamalarında en önemli sorunlardan biri damla penetrasyonudur, diğer bir deyişle damlaların bitkinin alt ve iç yapraklarına ne ölçüde ulaşılabilirdir. Bu çalışmada da üzüm bağlarında iki farklı ZİHA modelinin farklı uygulama ve uçuş parametreleri ile yapılan püskürtme uygulamalarında hangi parametrelerin en iyi penetrasyon ve damla dağılımına sebep verdiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

1. Zirai İnsansız Hava Araçları (ZİHA)

Üzüm bağlarında püskürtme denemelerinde iki adet ZİHA modeli kullanılmıştır. Bunlar DJI markasına ait Agras MG-1P ve Agras T40 modelleridir (Şekil 2).



(a)



(b)

Şekil 2. DJI Agras T40 (a) ve Agras MG-1P (b)

İki model de pestisit uygulamalarında, gübreleme ve tohum ekimi uygulamalarında kullanılmaktadır. İki modelin birbirinden farklı olduğu noktalar ilaç tankı hacmi, rotor sayısı ve dizilişi, kalkış ağırlığı ve meme tipidir. Agras MG-1P modeli Türkiye’ye ilk ithal edilen ZİHA türleri olup, 10 litre depo hacmine, merkez etrafına dizilmiş 8 rotora ve 4 adet yelpaze hüzmeli hidrolik memelere sahip iken, Agras T40 model ise 40 litre depo hacmine, çift sıra dizilmiş 8 rotora ve iki adet santrifüj memeye sahiptir.

Burada iki ZİHA karşılaştırırken, ZİHA sektöründe her geliştirilen modelle beraber, uygulama başarısının ne denli geliştiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İki ZİHA’nın teknik özellikleri Çizelge 1.’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. ZİHA'ların Teknik Özellikleri

Özellikler	Agras MG-1P	Agras T40
Toplam Boş Ağırlık	38 kg	14,7 kg
Ölçüler (mm)	2800 × 3150 x 780 mm (kollar ve pervaneler açık) 1125 × 750 × 850 mm (kollar kapalı)	1471× 1471 x 482 mm (kollar ve pervaneler açık) 780 × 780 × 482mm (kollar kapalı)
Maksimum Güç Tüketimi (W)	6400	3500
Maksimum Uçuş Süresi (dakika)	18	24
Bitki Üzeri En Düşük Uçuş Yüksekliği (m)	0,5	1,5
Meme Tipi ve Sayısı	Döner diskli meme 2 adet	4 adet yelpaze hüzmeli hidrolik meme
Meme debisi (l min-1)	6	4,8
Tank Kapasitesi (litre)	40	10
Maksimum Teorik İş Genişliği (m)	11	6
Maksimum Uçuş Hızı (m s-1)	12	7

İki ZİHA da uzaktan kumanda vasıtası ile önceden sınırları çizilmiş parsel üzerinde istenen uygulama parametrelerine otonom olarak uygulama yapabilmektedir. Santrifüj memelerin düşük hacimli

uygulamalarda hidrolik memelere kıyasla daha etkili oldukları bilinmektedir (Gong ve ark, 2019; He, 2018). Agras T40 modelinde de damla çapları santrifüj memelerin dönme hızı değiştirilerek 50-500 µm arasında değiştirilebilmektedir.

2. Deneme Arazisi ve Koşulları

Denemeler Tekirdağ Bağcılık Araştırma Enstitüsü araştırma arazilerinde bulunan Papazkarası çeşidi şaraplık üzüm parsellerinde gerçekleştirilmiştir. Toplam parsel alanı 1500 m²'dir. Denemelerin yapıldığı 02.08.2024 tarihinde asmalar BBCH 73-75 evresindedir (Lorenz vd.,1995). Bu dönemin seçilmesinin sebebi, asmaların kanopi yoğunluğu en yüksek seviyede olduğu için, damla dağılımı ve penetrasyonun başarısının ölçülebileceği en zorlu koşullar olmasıdır. Deneme parselinde sıra arası mesafe 2.2 m ve omçaların en yüksek noktası 1.8 m olarak ölçülmüştür. Püskürtme denemelerinde rüzgâr hızı, bağıl nem ve hava sıcaklığı değerleri Testo 605-H1 termohidrometre (Testo SE & Co. KGaA, 2023) ve Lutron AM 4202 anemometre (Lutron Instruments, 2023) ile ölçülmüştür. Ortalama hava sıcaklığı 29,7 °C, bağıl nem %57,3, 2 metre yükseklikte rüzgâr hızı ise 2,4 m/s olarak belirlenmiştir.

3. Deneme Planı

Denemelerde 2 farklı ZİHA, iki farklı uçuş doğrultusu (sıraya dik ve paralel) ve 3 farklı ortalama damla çapı ile denemeler yapılmıştır. Agras T40 model ZİHA'da 500 µm'ye kadar damla üretilse de, MG-1P model ZİHA'da 300 µm'ye kadar ölçülebilmektedir. Oluşan deneme planı Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Deneme Planı

Deneme No	iHA	Uçuş Yönü (m)	Damlacık Boyutu (μm)	Uçuş Hızı (m/s)	Püskürtme Normu (l/da)
1	T40	Sıraya paralel	100	3,5	4
2	T40	Sıraya paralel	300	3,5	4
3	T40	Sıraya paralel	500	3,5	4
4	T40	Sıraya dik	100	3,5	4
5	T40	Sıraya dik	300	3,5	4
6	T40	Sıraya dik	500	3,5	4
7	MG-1P	Sıraya paralel	100	1,6	4
8	MG-1P	Sıraya paralel	300	3	4
9	MG-1P	Sıraya dik	100	1,6	4
10	MG-1P	Sıraya dik	300	3	4

4. Damla Analizleri

Damla analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla, uçuş hattı üzerinde rastgele olarak üç asma bitkisi seçilmiştir. Her bir asma; üst, orta ve alt yaprak bölgesi şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu bölgelerdeki farklı yapraklara, ataç kullanılarak üçer adet suya duyarlı kâğıt yerleştirilmiştir. Böylece her uçuşta toplam 27 adet suya duyarlı kâğıt kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Suya Duyarlı Kağıtların Yerleşimi

Her uçuş sonrasında, damlaları emmiş ve kurumuş olan suya duyarlı kâğıtlar dikkatlice toplanarak kapalı kaplara alınmıştır. Bir sonraki uçuş için aynı noktalara yeni kâğıtlar yerleştirilmiş ve bu işlem tüm denemeler tamamlanana kadar sürdürülmüştür. Alan çalışmalarının ardından, tüm suya duyarlı kâğıtlar 600 dpi çözünürlükte tarayıcıyla taranarak dijital ortama aktarılmıştır. Elde edilen görüntüler, damlacık analizlerini yapmak amacıyla DepositScan yazılımında işlenmiştir (Zhu vd., 2011). Görüntü işleme tabanlı bu yöntem, hızlı ve etkin bir analiz imkânı sunmaktadır (Beyaz vd., 2017).

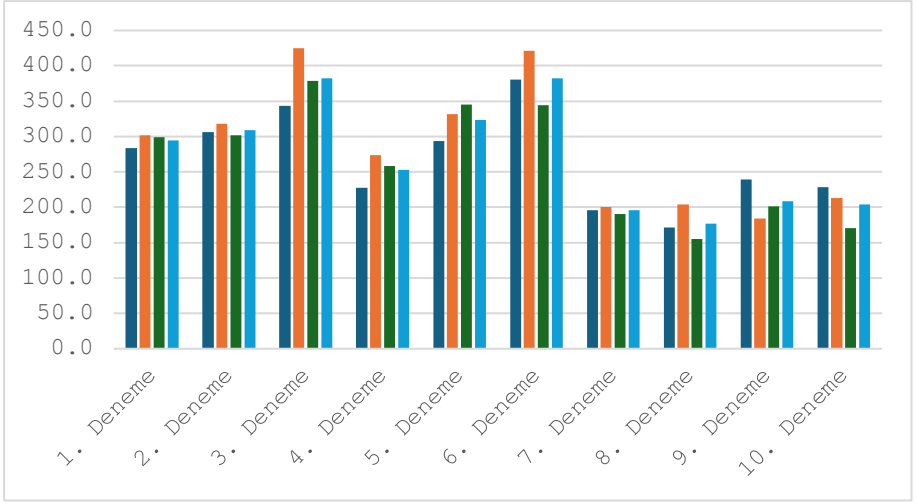
Analizlerde; hacimsel orta çap ($Dv0.5$), kaplama oranı, damlacık yoğunluğu ve efektif uygulama hacmi gibi temel damla parametreleri hesaplanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Tüm uçuşlardan ve analizlerden sonra elde edilen sonuçlar, grafikler halinde gösterilmiş ve farklı parametreler buna göre değerlendirilmiştir.

Damla analiz programında hacimsel orta çaplar bir düzeltme katsayısı ile hesaplanmakta, uçuşlardan önce de hedeflenen damla çapları Agras T40 modelinde uzaktan kumanda üzerinden, Agras MG-1P modelinde de yine kumanda üzerinden hız ve basınç değişimi ile ayarlanmaktadır. Şekil 4'te elde edilen hacimsel orta çaplara baktığımızda T40 model ZİHA'nın hedeflenen damla çaplarına daha yakın değerlerle uygulama yaptığı görülmüştür.

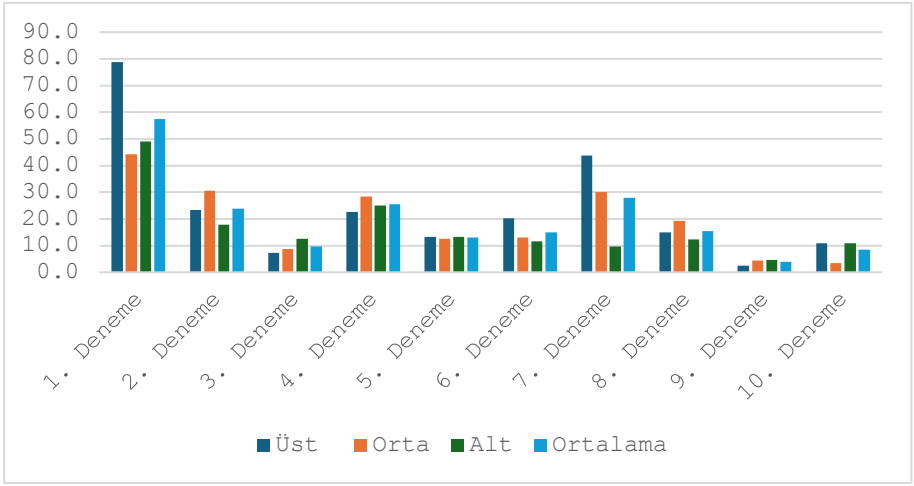
1. ve 4. Denemelerde ortalamaların hedeflenen yüksek çıkması, damla analiz programının 100 µm çapları ayırt etme başarısının düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Agras MG-1P ile yapılan uygulamalarda ise hedeflenen damla boyutlarına ulaşamamıştır. Bu durum da, hacimsel ortalama çapların hidrolik meme üreticisinin taahhüt ettiği değerler üzerinde teorik olarak hesaplanması sonucunda gerçek değere ulaşamamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. Hacimsel Orta Çap ($D_{v0,5}$)

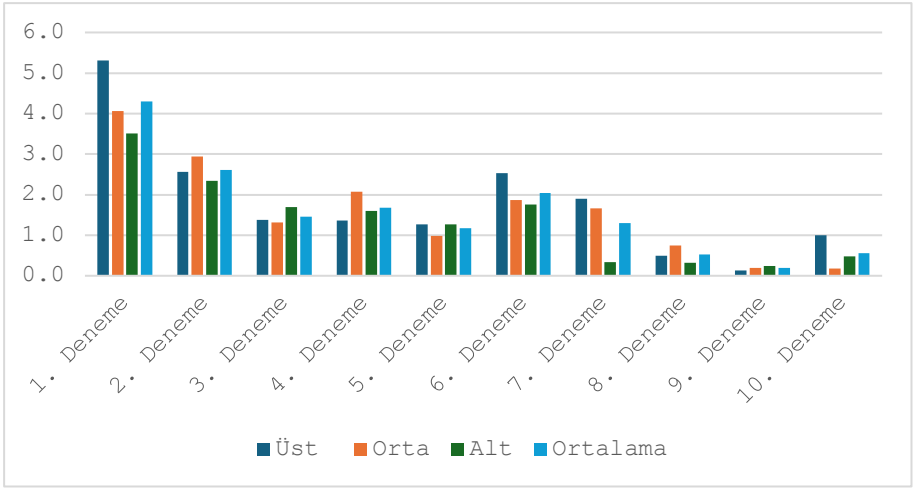
Şekil 5.'teki damlacık yoğunluğu grafiklerine bakıldığında ise en yüksek damla yoğunluğu 1. Denemede, en düşük damla yoğunluğu ise 9. Denemeden elde edilmiştir. T40 ile yapılan uygulamalar özeline bakıldığında aynı uygulama hacminde küçük damlaların daha küçük ve sık olmasından kaynaklı bir yoğunluk söz konusudur.

Küçük çaplı damlalar, hava akımıyla yatay yönde de hareket ederek alt yapraklara da daha iyi ulaşmış, büyük damlalar yer çekimi ve aşağı yönlü hava akımı sebebiyle zemine doğru yönelmiştir (Wang vd, 2022). İki ZİHA karşılaştırıldığında ise T40 ile yapılan uygulamalarda aynı parametrelerde daha iyi birikimler olduğu söylenebilir.



Şekil 5. Damla Yoğunluğu (damlacık/cm²)

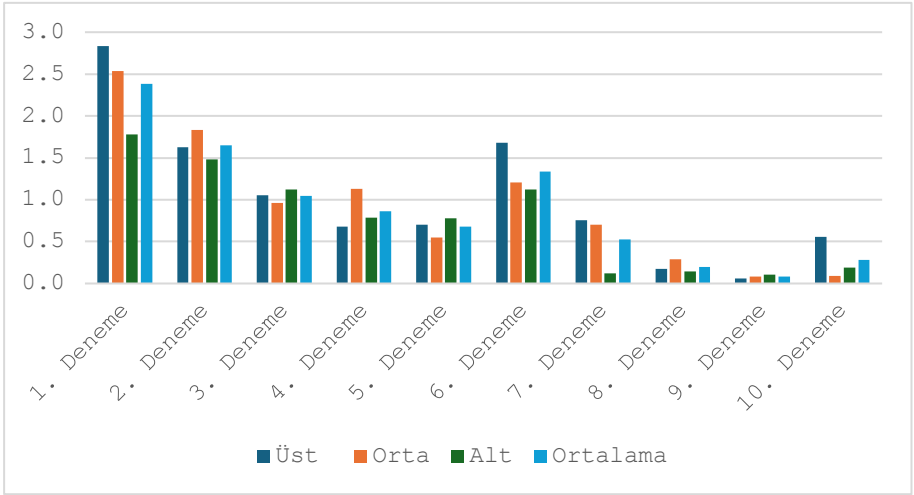
Suya duyarlı kağıt yüzeylerinin yüzde kaçının sıvıyla kaplandığını gösteren kaplama yüzdesine baktığımızda (Şekil 6.) en yüksek kaplama yüzdesinin 1. denemede (%4,2) en düşük kaplama yüzdesinin ise 9. denemede (%0,2) elde edildiği görülmektedir. Yüksek damla yoğunluğu aynı zamanda yüksek kaplama yüzdesine de olanak verdiği için damla yoğunluğu ve kaplama yüzdesi pozitif korelasyon göstermiştir. Ancak yine de geleneksel uygulamalara göre bu değerler oldukça düşük kalmaktadır. Literatürde geleneksel uygulamalarda %60-70 kaplama yüzdesleri bildirilmiştir (Mahmood vd., 2004; Sedlar vd., 2013).



Şekil 6. Kaplama Yüzdesi (%)

Şekil 7’deki grafiklerde gösterilen efektif norm, püskürtme uygulamalarında elde edilen gerçek norm olarak ifade edilmektedir. İki ZİHA’da da uygulamalarda ayarlanan teorik norm 4 l/da idi. Ancak grafikte bu değere en yakın olarak 1. uygulamadaki 2.7 l/da olarak hesaplanmıştır. Sıraya paralel uçuşlarda, hafif damlacıkların İHA’nın oluşturduğu hava akımlarıyla yatay yönde taşınması sonucunda, damlaların bahçe zeminine doğru sürüklenmesi belirgin şekilde azalmıştır.

Bununla birlikte, grafiklerde elde edilen efektif norm değerlerinin teorik normlara kıyasla bu kadar düşük çıkması yalnızca aşağı yönlü sürüklenme ile açıklanamaz. Püskürtme denemelerinin Ağustos ayında, yaklaşık 30 °C hava sıcaklığında gerçekleştirilmiş olması nedeniyle buharlaşma kayıplarının da önemli bir etken olduğu dikkate alınmalıdır.



Şekil 7. Efektif Norm (I/da)

SONUÇ

Çalışmada elde edilen bulgular, damlacık karakteristiklerinin kullanılan ZİHA modeline ve uçuş yönüne bağlı olarak belirgin şekilde değiştiğini ortaya koymuştur. T40 ile gerçekleştirilen uygulamalarda ölçülen hacimsel orta çap ($Dv_{0,5}$) değerlerinin, hedeflenen damla büyüklükleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Buna karşın MG-1P ile yapılan uygulamalarda istenen damla çaplarına tam olarak ulaşılammıştır. Ortalama damla çapındaki artışın damla yoğunluğunu azalttığı; aynı şekilde alt yapraklardaki pestisit birikiminde de düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Uçuş yönü kıyaslandığında, sıraya paralel ilerleme sırasında 100 ve 300 mikron damla çaplarında elde edilen kaplama yüzdesinin, sıraya dik uçuşlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte her iki İHA modelinde de sıraya dik uçuşlarla gerçekleştirilen uygulamalarda üst ve alt yapraklardaki birikim değerlerinin birbirine yakın olması, bu uçuş yönünde damla

dağılımının daha homojen olduğunu göstermektedir. En yüksek kaplama ve damla dağılımının ise 100 mikron damla çapında ve sıraya paralel uçuş yönünde T40 ile yapılan uygulamalarda gerçekleştiği belirlenmiştir.

Genel olarak sonuçlar, gelişen ZİHA teknolojilerinin pestisit uygulamalarında etkinliği önemli ölçüde artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı pestisit formülasyonlarıyla benzer damla parametreleri değerlendirilerek biyolojik etkinliğin ortaya konması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Anonim. (2024). *DJI Agras T40 specifications*. DJI. <https://www.dji.com/global/t40/specs>
- Anonim. (2021). *Bağ hastalıkları ve mücadele yöntemleri*. Bayer Crop Science. <https://www.cropscience.bayer.com.tr/turkiye/tarim-haberleri/bag-hastaliklari-mucadele.html>
- Beyaz, A., Dağtekin, M., Çilingir, I., & Gerdan, D. (2017). Evaluation of droplet size spectra for agricultural pesticide applications using water sensitive paper and image analysis techniques. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(12A), 102–108.
- Biglia, A., Comba, L., Alcatrão, L. E., Sopegno, A., Messina, C., Mozzanini, E., Bloise, N., Guglieri, G., & Grella, M. (2023). Comparison between 60° and 30° hollow cone nozzles for targeted UAV-spray applications in vineyards. In *Precision agriculture '23* (pp. 67–73). Wageningen Academic Publishers.
- Biglia, A., Grella, M., Bloise, N., Comba, L., Mozzanini, E., Sopegno, A., Pittarello, M., Dicembrini, E., Alcatrão, L. E., Guglieri, G., Balsari, P., Ricauda Aimonino, D., & Gay, P. (2022). UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 845, 157292.
- Deliorman, O. D., Ergun, F., & Orhan, N. (2011). Anadolu medeniyetlerinde asma (*Vitis vinifera* L.). *Tarih Araştırmaları Dergisi*, 30(50), 69–80.
- Foreign Agricultural Service. (2023). *Coffee: World markets and trade*. U.S. Department of Agriculture. <https://fas.usda.gov/data/production/commodity/0575100>
- Gong, J., Fan, W., & Peng, J. (2019). Application analysis of hydraulic nozzle and rotary atomization sprayer on plant protection UAV. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2(1).

- He, X. (2018). Rapid development of unmanned aerial vehicles (UAV) for plant protection and application technology in China. *Outlooks on Pest Management*, 29(4), 162–167.
- International Organisation of Vine and Wine. (2024, April). *State of the world vine and wine sector in 2023*. https://www.oiv.int/sites/default/files/202404/OIV_STATE_OF_THE_WORLD_VINE_AND_WINE_SECTOR_IN_2023.pdf
- Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., & Weber, E. (1995). Growth stages of the grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*)—Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1(2), 100–103.
- Mahmood, H. S., Iqbal, M., Hussain, K. A., & Hamid, T. (2004). Improved surface coverage with environmentally effective university boom sprayer. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 41(3/4), 152.
- Morales-Rodríguez, P. A., Cano Cano, E., Villena, J., & López-Perales, J. A. (2022). A comparison between conventional sprayers and new UAV sprayers: A study case of vineyards and olives in Extremadura (Spain). *Agronomy*, 12, 1307. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061307>
- Önler, E., Özyurt, H. B., Şener, M., Arat, S., Eker, B., & Çelen, İ. H. (2023). Spray characterization of an unmanned aerial vehicle for agricultural spraying. *The Philippine Agricultural Scientist*, 106(1), 39–46.
- Özyurt, H. B., & Çelen, İ. H. (2022). İnsansız hava araçları ile yapılan pestisit uygulamalarında farklı meme tiplerinin damla dağılımına etkisinin incelenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 18(3), 157–172.
- Özyurt, H. B., & Çelen, İ. H. (2023, September). Effect of different flight parameters on spraying efficacy in pesticide applications

- with unmanned aerial vehicle in sunflower. In *AGRIBALKAN 2023 V. Balkan Agricultural Congress* (p. 231).
- Sassu, A., Psiroukis, V., Bettucci, F., Ghiani, L., Fountas, S., & Gambella, F. (2024). Unmanned aerial system plant protection products spraying performance evaluation on a vineyard. *Precision Agriculture*, 25(4), 2082–2112. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10155-8>
- Sedlar, A. D., Bugarin, R. M., Nuytens, D., Turan, J. J., Zoranovic, M. S., Ponjican, O. O., & Janic, T. V. (2013). Quality and efficiency of apple orchard protection affected by sprayer type and application rate. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(4), 935–944.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). *Tarımsal alet ve makine sayıları*. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1>
- Wang, C., Liu, Y., Zhang, Z., Han, L., Li, Y., Zhang, H., Yangfan, L., Zhang, H., Wongsuk, S., Li, Y., Wu, X., & He, X. (2022). Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. *Pest Management Science*, 78(6), 2449–2466.
- Wang, C., Herbst, A., Zeng, A., Wongsuk, S., Qiao, B., Qi, P., ... & He, X. (2021). Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of the Total Environment*, 777, 146181.
- Zhu, H., Salyani, M., & Fox, R. D. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1), 38–43.

BÖLÜM 5

SERA KAZANLARINDA KULLANILAN ASFALTİNİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN GC-MS ANALİZİ¹

Dr. Öğr. Üyesi Abdulkadir AYANOĞLU*
Dr. Öğr. Üyesi Orhan ARPA

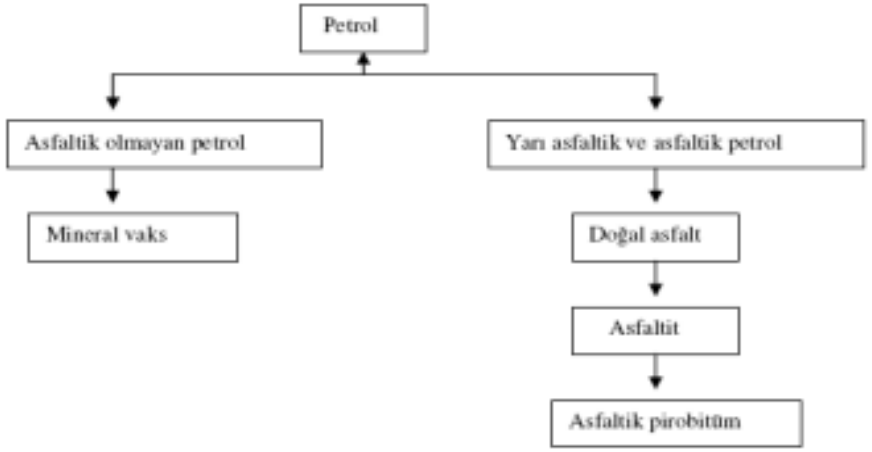
GİRİŞ

Son yüzyılda, fosil kökenli yakıtların ucuz olması nedeniyle bu yakıtlar hem endüstride hem de teknolojik gelişmelerde yaygın olarak kullanılmıştır. Petrol ve türevi olan kömürün egemen olduğu bu dönemde; kömürün 235 yıl, petrolün 43 yıl, doğalgazın ise 66 yıl daha süreceği öngörülmekte, buna karşılık bir günde bin yıllık fosil yakıtın tüketildiği belirtilmektedir (Büyükmihci, 2003; Yılmaz vd., 2003).

Tektonik hareketler sonucunda petrol yatakları arasında oluşan yarıklarda meydana gelen bu yapı, yumuşak halden sert yapıya doğru dönüşür ve en son aşamada asfaltik pirobitümlere evrilir (Şekil 1.1). Asfaltit siyah renkli, parlak veya donuk parlak görünümlü, yoğun ve sert bir yapıya sahiptir. Şırnak'ın güneyinde yer alan Avgamasya filonunda ortalama 80–100 metre kalınlıkta uzandığı bildirilmektedir (Yönetim Kurulu, 1976).

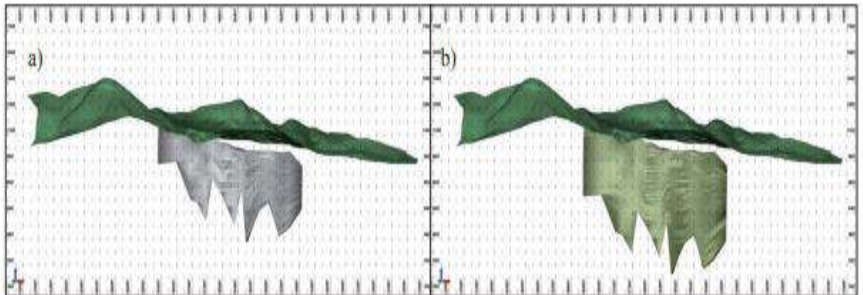
Petrol türevi bir kömür çeşidi olan asfaltit, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ısınma amacıyla temel bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak düşük ısı değeri, yüksek kül oranı ve yüksek sülfür içeriği nedeniyle yakıt kalitesi sınırlıdır (Taşkesen vd., 2022).

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



Şekil 1. Asfaltik pirobitüm oluşma evreleri (Orhun, 1969)

Dünya genelinde asfaltit, açık maden işletmeciliği yöntemiyle çıkarıldığından dolayı düşük ekonomik maliyete sahiptir. Şırnak ili ve çevresinde bulunan asfaltitin görünür rezervi yaklaşık 15.925.088 m³ olup, bunun 22.454.374 ton olduğu belirlenmiştir. Muhtemel rezervin ise 12.204.159 m³ hacminde ve yaklaşık 12.204.159 ton olduğu tahmin edilmektedir. Böylece toplam asfaltit rezervinin yaklaşık 40 milyon ton civarında olduğu öngörülmektedir (Şekil 1.2). Çıkarılan asfaltit, bölgedeki termik santrallerde enerji üretimi amacıyla değerlendirilmektedir (Öztürk vd., 2015).



Şekil 2. Filonun kuzeyden görünümü a) Görünür Rezerv b) Görünür ve Muhtemel Rezerv (Öztürk vd., 2015).

Yüksek rezerv potansiyeline sahip Şırnak asfaltiti, hem çevredeki yerleşim alanları için kış aylarında bir ısınma kaynağı olarak kullanılmakta hem de yakınında kurulu bulunan termik santral için enerji kaynağı işlevi görmektedir.

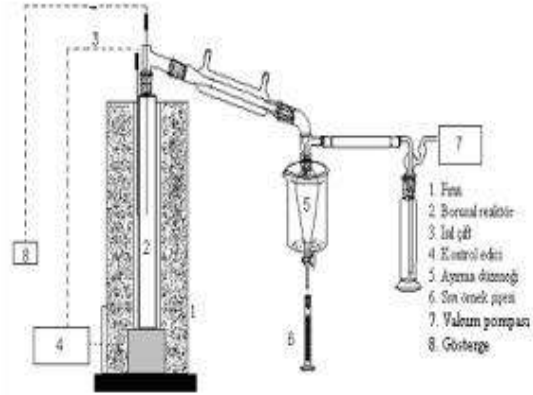
Seralarda ısıtma işlemi; iklim koşulları, sera donanımı ve yapı özellikleri gibi etmenlerden etkilenmektedir. DIN 4701 standartlarına göre sera ısı gücü hesaplanmakta, bu hesaplamalar en düşük dış sıcaklık değerleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Buna bağlı olarak, uygun kazan kapasitesi ve yakıt tipi belirlenmektedir.

Sun ve arkadaşları (Sun vd., 2019), Shendong demineralize kömürü (DC) ile etanol ile yıkanmış kömürü piroliz ederek FTIR, CP/MAS 13C-NMR, TG-FTIR ve Py-GC/MS cihazlarıyla fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Shendong demineralize kömüründe alifatik bileşenlerin kütsel olarak %8,65 oranında azalmasının, küçük ve zayıf bağların etanol tarafından etkilenmesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise Şırnak asfaltitinin katı hâlde sahip olduğu kimyasal ve fiziksel özellikler literatürden alınmış; piroliz ünitesinde gerçekleştirilen sıvılaştırma işlemi sonucunda elde edilen ürün, CaO katalizörü kullanılarak işleme tabi tutulmuştur. Elde edilen sıvı numunenin kimyasal karakterizasyonu GC-MS analiziyle belirlenmiştir.

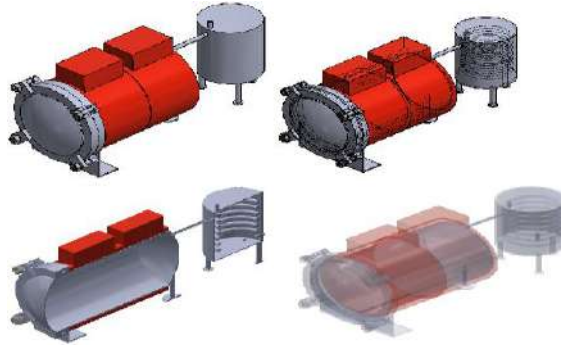
1. MATERYAL VE YÖNTEM

Şırnak ili sınırları içerisinde yer alan Silopi ilçesinde çıkarılan asfaltit, Melike ve arkadaşları tarafından yarı kesikli bir reaktörde piroliz edilerek numune elde edilmiştir (Şekil 3) (Sezer vd., 2007).



Şekil 3. Yarı Kesikli Reaktör

Şekil 4' te ise Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında kurulu olan pirolitik distilasyon reaktörünün şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4. Pirolitik Distilasyon Reaktörü

Bu çalışmada Şırnak asfaltiti toz haline getirilip pirolitik distilasyon reaktöründe 350 °C'ye kadar 3 farklı sıcaklıkta ısıtılarak numune elde edilmiştir.

2. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

2.1. Asfaltitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Literatürde asfaltit için yapılan elemental ve proksimat analizler incelendiğinde, elde edilen sonuçlara göre karbon oranı %18,07 olan asfaltitlerin Jilsonit asfaltit türüne dâhil olduğu belirtilmektedir (Kelso ve Alfred, 1944).

Bu projede, Şırnak asfaltiti toz hâline getirilerek Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan sabit yataklı reaktörde 350 °C sıcaklığa kadar piroliz edilmiştir. Piroliz işlemi sonucunda, gaz ve sıvı yakıt ürünleri farklı oranlarda elde edilmiştir. Optimum asfaltit sıvı numunesinin fiziksel özellikleri şu şekilde belirlenmiştir: yoğunluk 901 kg/m³, kinematik viskozite 1,17 mm²/s, kükürt oranı %2,94, alt ısı değeri 9781 kcal/kg, akma noktası <-30 °C, parlama noktası ise 49 °C'dir.

Numunelerin kimyasal özellikleri kapsamında yapılan proksimat analiz sonuçları; nem oranı %0,38, kül oranı %45,43, uçucu madde oranı %35,33 ve sabit karbon oranı %18,07 olarak belirlenmiştir. Elemental analiz sonuçlarına göre ise karbon %42,6, hidrojen %3,57, azot %0,40, kükürt %4,85 ve oksijen %48,58 oranında tespit edilmiştir.

Literatürde yapılan kül analizlerinde; nikel (%0,20), molibden (%0,33), vanadyum (%0,57), titanyum (%1,15) ve uranyum oksit (U₃O₈: %0,006-0,022) elementlerinin bulunduğu rapor edilmiştir. Bu değerler, asfaltitin çevreyle uyumlu bir yakıt alternatifi olduğunu göstermektedir (Chilingarian ve Yen, 1978).

2.2. GC-MS Analizi

Gaz Kromatografisi Kütle Spektrometresi (GC-MS) farklı çalışma alanlarında kullanılırken Petrokimya Endüstrisinde yakıt analizinde de üretilmiş numunelerin içeriğini kalitatif ve/veya kantitatif analizini yapılmaktadır.

Shimadzu Marka QP2010 ULTRA Model Cihazın Teknik Özellikleri:

- İyonizasyon voltajı; 10-200 Ev

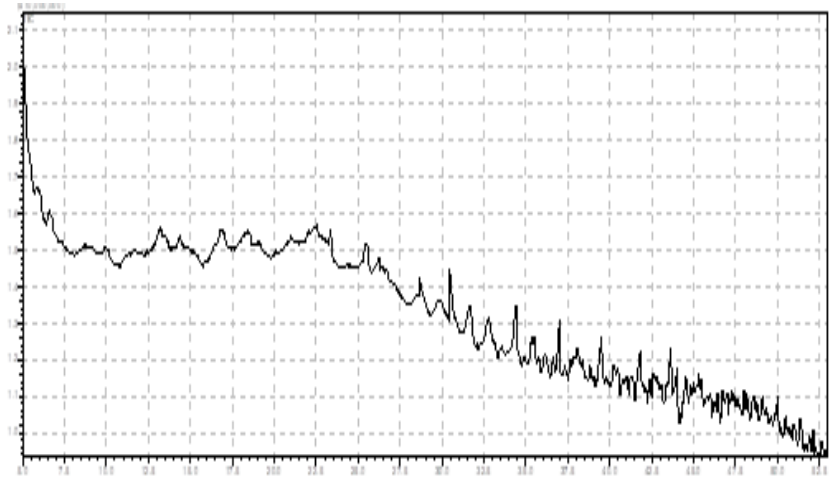
- Kütle Aralığı; m/z 1.6-1050 amu
- Tarama hızı en az 12.500 amu/saniye
- Pirolizer Cihazı 1600C -8000C

Numune özellikleri ise çözünmemiş sıvı numuneler için en az 100 uL (ekstrakt), partiküllerinden temizlenmiş, santrifüjlenmiş olup belli bir uçuculuğa (uçucu/yarı uçucu) sahip olmalıdır.

GC-MS cihazı ile analizinde yapılan analizde, Şekil 6.'da sıvı numune için ortaya çıkan pikler verilmiştir. Bu peakler sıvı numunenin kimyasal özellikleri tespit edilmesini sağlamıştır. Piklerde bulunan Benzene, tetramethyl, Octadecane gibi birleşik yapıları yaygın olarak geleneksel yakıt türlerinde bulunan birleşiklere benzemektedir. Ayrıca yakıt içerisinde bulunan diğer birleşiklerde Tablo 1'de sunulmuştur. Bu birleşik yapıların yakıtın yanma verimliği ve ayrıca kazan performansında artış sağladığı öngörülmüştür.



Şekil 5. GC-MS Cihazı



Şekil 6. GC-MS Pikleri

Tablo 1. Sıvılaştırılmış Asfaltit Birleşenleri (GC-MS Analiz Sonuçları)

N o	Name	m/z	Retenti on time	Retenti on Index
1	Cyclopentane, (2-methylbutylidene)-	28.00	6.515	914
2	Octane, 3,6-dimethyl- (CAS)	57.00	6.605	917
3	1-Decene (CAS)	43.00	6.775	924
4	Undecane, 4,6-dimethyl-	57.00	8.730	999
5	2-Thiopheneacetic acid, octyl ester	97.00	13.080	1101
6	Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	71.00	16.685	1169
7	Octane, 4,5-dipropyl-	57.00	18.380	1202
8	Benzene, 1,2,3-trimethyl- (CAS)	105.00	23.340	1307
9	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	105.00	25.400	1359
10	Benzene, 1-methyl-4-propyl- (CAS)	105.00	25.535	1363
11	Acetic acid (CAS)	43.00	28.675	1448

12	10-Methylnonadecane	57.00	28.740	1450
13	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	119.00	28.855	1454
		0		
14	Formic acid	46.00	30.450	1501
15	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	96.00	31.405	1532
16	Docosane (CAS)	57.00	31.540	1537
17	Pentadecane	57.00	31.665	1541
18	Pentafluoropropionic acid, heptadecyl ester	57.00	32.780	1578
19	Hexadecane	57.00	34.415	1635
20	1,3-Hexanedione, 1-phenyl-2,5-dimethyl-	105.00	35.315	1668
		0		
21	n-Pentadecanol	97.00	35.500	1675
22	Sulfurous acid, cyclohexylmethyl tetradecyl ester	97.00	36.615	1717
23	Heptadecane	57.00	37.005	1732
24	Octadecanoic acid, (2-phenyl-1,3-dioxolan-4-yl)methyl ester, cis-	105.00	37.295	1743
		0		
25	4-(3,3-Dimethyl-2-phenyl-oxiran-2-yl)-butan-2-one	43.00	37.445	1749
26	Cyclohexanol, dodecyl- (CAS)	57.00	37.635	1757
27	Naphthalene	128.00	37.845	1765
		0		
28	3-Chloropropionic acid, undecyl ester	83.00	38.055	1773
29	Oleyl alcohol, trifluoroacetate	69.00	38.355	1785
30	Tetracosane, 2,6,10,15,19,23-hexamethyl- (CAS)	71.00	38.825	1804
31	1',1'''-bis[1-Methylethenyl]-1,1''-(2,3-dimethylbutan-2,3-diyl)-bis[ferrocene]	71.00	39.045	1813
32	Octadecane	57.00	39.500	1832
33	Formic acid, 10-chlorodecyl ester	106.00	39.770	1843
		0		

34	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CAS)	57.00	40.245	1863
35	1-Heptacosanol (CAS)	83.00	40.485	1873
36	Trihexadecyl borate	57.00	40.725	1883
37	Octadecane, 3-methyl-	57.00	40.995	1894
38	2-methylhexacosane	28.00	41.315	1908
39	Heneicosane	57.00	41.815	1930
40	Octadecane (CAS)	28.00	42.400	1956
41	Hexadecane, 1-chloro-	57.00	42.585	1964
42	1-Heptadecene (CAS)	141.00	42.790	1973
43	Phenol	94.00	43.625	2010
44	Tetracosane	57.00	43.990	2026
45	Dodecane, 1,1'-oxybis-	71.00	44.545	2051
46	n-Heptadecylcyclohexane	82.00	44.835	2064
47	p-Cresol	107.00	45.285	2083
48	Phenol, 2-methyl-	108.00	45.465	2091
49	Heneicosane	57.00	45.990	2115
50	Cyclohexane, 1,1'-[1-(2,2-Dimethylbutyl)-1,3-Propanediyl]BIS-	28.00	46.215	2125
51	Cyclandelate	107.00	46.440	2134
52	Sulfurous acid, butyl heptadecyl ester	57.00	46.730	2147
53	Cyclohexanecarboxylic acid, 4-isopropylphenyl ester	121.00	47.000	2159
54	Phenol, 3-ethyl- (CAS)	107.00	47.250	2170
55	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CAS)	57.00	47.590	2185
56	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CAS)	57.00	48.015	2204
57	Phenol, 4-(1-methylethyl)- (CAS)	121.00	48.160	2210

58	Tridecane, 5-propyl-	71.00	48.580	2229
59	Ditetradecyl ether	85.00	48.790	2238
60	Tridecane, 4-cyclohexyl-	82.00	49.110	2252
61	Benzene, tridecyl-	119.00	49.590	2274
62	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CAS)	57.00	50.000	2292
63	Tetracontane	57.00	50.470	2312
64	Fumaric acid, dodecyl 2-heptyl ester	57.00	50.665	2321
65	17-(1,5-Dimethylhexyl)-10,13-dimethyl-4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17-tetradecahydro-3H-cyclopenta[a]phenanthrene	71.00	51.015	2337
66	Carbamic acid, (.alpha.-methylbenzyl)-, 9-decenyl ester	83.00	51.360	2352
67	6-Methyl-4,5-tetramethylene-2,6-diphenyl-5,6-dihydro-4H-1,3-oxazine	105.00	51.650	2365
68	Propipocaine	121.00	51.875	2375
69	Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CAS)	57.00	52.125	2386
70	Tetracontane	57.00	52.625	2408

3. SONUÇ

Asfaltitin sabit yataklı reaktörde 350 °C'ye kadar sıvılaştırılması sonucunda, elde edilen ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Fiziksel özellikler açısından, numunenin alt ısı değeri 9781 kcal/kg olarak belirlenmiştir. Kimyasal özellikler kapsamında yapılan proksimat analizinde sabit karbon oranı %18,07, elemental analizde ise karbon %42,6 ve hidrojen %3,57 olarak tespit edilmiştir.

GC-MS cihazıyla yapılan analiz sonucunda, sıvı numunede benzene, tetramethyl ve octadecane gibi bileşiklere rastlanmıştır. Bu

bileşik yapılar, yakıt türlerinde yaygın olarak bulunan bileşenlerle benzerlik göstermekte olup literatürle uyumludur.

Elde edilen sonuçlar hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerin, özellikle de GC-MS analizinde tespit edilen bileşik yapıların, yakıtın yanma verimini ve buna bağlı olarak kazan performansını artırdığı yönünde bir öngörü ortaya koymaktadır.

4. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, “Atık Kızartılmış Yağların ve Şırnak Asfaltitinin Yanma Karakteristiğinin Araştırılması” başlıklı ve MAÜ.BAP.22.MYO.025 numaralı proje kapsamında Mardin Artuklu Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Proje sürecinde hem BAP Birimine hem de Şube Müdürü Sn. Arif KABAK beye teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR

- Büyükmihci M. K. (2003). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği Ülkelerindeki uygulamalar ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Tarafından Hazırlanmakta Olan Kanun Tasarısı Taslağı Çerçevesinde Planlanan Önlemler. *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu* (p.15-22). TMMOB.
- Chilingarian, G.V., Yen T.F.(1978). Bitumes, Asphalts, and tar sand. *Developments in Petroleum Science*, Elsevier.
- İlker Y., İlbaş M., Su Ş. (2003). Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu* (p.399-401). TMMOB.
- Kelso J.L., Alfred R. (1944). Glance Pitch from Tell Beit Mirsim. *Powell Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 95(1), 14-18.
- Orhun, F. (1969). Güneydoğu Türkiye'deki Asfaltit Madenlerin Özellikleri, Metamorfoz Dereceleri ve Klasifikasyon Problemleri, *MTA Enstitüsü Dergisi*, 72(1), 146-158.
- Öztürk, C.A., Önsel, İ.E., Özkan, M., Fişne, A., Erçelebi, S.G. (2015). Production of Asphaltite by Underground Mining Methods. *Journal of Underground Resources*, 4(7), 1-14.
- Raadman (2025, Temmuz 22). *Sera ısıtma sistemleri ve karbondioksit enjeksiyon sistemlerinin incelemesi*. <https://raadmanburner.com/tr/blog/heating-system-in-greenhouses/>
- Sezer, M., Karaduman A., Ali Bilgesü, Y. (2007). Silopi Asfaltitinin Yarı Kesikli Reaktörde Pirolizi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 22(2), 307-313.
- Sun, M., Ma, M., Lv, B., Yao, Q., Gao, J., Wang, R., Zhang, Y., Ma X. (2019) Pyrolysis characteristics of ethanol swelling Shendong coal and the composition distribution of its coal tar, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 138(1), 94–102.
- Taşkesen, E., Acar S., Arlı F., Dumrul H., Ertuğrul G., Bülbül S., Özcan E. (2022). Şırnak-Uludere Bölgesinde Yaygın Olarak Bulunan Asfaltitlerden Doğal Hümik Asit Elde Edilebilirliğinin

İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 25(2), 691-697.
<https://doi.org/10.2339/politeknik.766461>
Yönetim Kurulu, Asfaltitler Üzerine. (1976). *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 15(6), 5-7.

BÖLÜM 6

BİYOGAZ ÜRETİMİ VE KULLANIMINDA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK¹

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK*

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

GİRİŞ

Sürdürülebilirlik, enerjinin önemli katkılarda bulunduğu iklim değişikliği konusundaki ciddi endişelerin doğrudan bir sonucu olan günümüzde önemli bir endişe kaynağıdır. Enerji temini, yaşamı, refahı ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek için gereken kritik bir konudur. Günümüzde, küresel enerji talebinin %80'i fosil kökenli enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Bu durumun başlıca nedenleri fosil kaynakların yüksek ısı değerleri, bulunabilirlikleri ve kolay erişilebilirlikleridir. Ancak, çevresel bozulma (sera gazı salımları yoluyla) ve halk sağlığı endişeleri (hava kirletici salımlar) fosil yakıtlarla ilişkili başlıca sorunlardır. Bu çalışmada, biyogaz üretimi ve kullanımında sürdürülebilirliğin sağlanması incelenmiştir. Enerji üretimi ve kullanımında sürdürülebilirlik, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımıyla büyük ölçüde gerçekleştirilen teknik, politik, sosyal, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamayı amaçlamaktadır.

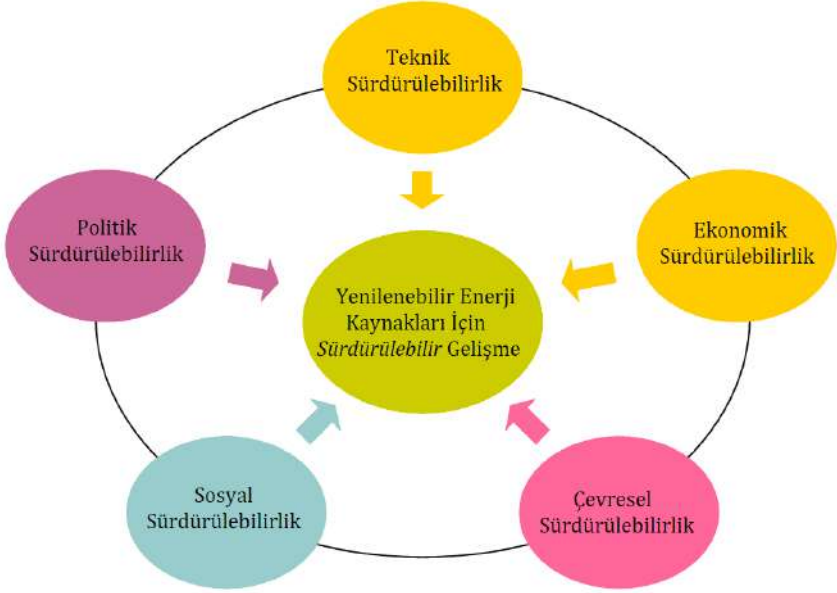
Çevresel etkinin önemini dikkate alarak tarımsal üretim ve orman atıklarından üretilen biyogaz, olumlu çevresel ve sosyoekonomik etkilere sahip yenilenebilir bir enerji alternatifi sunmaktadır. Biyogazın en önemli faydası, fosil yakıtların yerini alarak sera gazı (GHG) salımlarını azaltmasıdır.

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

Biyogazın daha az çevresel olumsuz etkisi olmakla birlikte, çoğunlukla CO₂, CH₄ ve N₂O olmak üzere bazı GHG salımlarıyla ilişkilidir. İlişki seviyesi kullanılan teknolojiye veya biyogaz kaynağına bağlıdır. Bu nedenle, biyogazın sürdürülebilir enerji dönüşümündeki olumlu rolü, kullanılan dönüşüm teknolojisinin seçimine ve biyogaz kaynağına bağlıdır. GHG salımlarını azaltılmasının yanı sıra biyogaz, hem yenilenebilir olması hem de hammadde olarak yerel olarak mevcut malzemeleri kullanması nedeniyle enerji güvenliği sağlar. Biyogaz üretiminde genellikle pahalı olan ve kirlletici endüstriyel süreçler kullanılarak üretilen kimyasal gübrelerin yerine gübre olarak kullanılmak üzere fermente olmuş yararlı bir madde açığa çıkar. Doğal gaz yerine biyometan kullanımı, doğal gaz şebekelerine sürdürülebilir bir tedarik yolu ve araçlar için bir ulaşım yakıtı ikamesi olabilir.

Sürdürülebilirlik, elektriğin önemli katkılarda bulunduğu iklim değişikliği konusundaki ciddi endişelerin doğrudan bir sonucu olan günümüzde önemli bir endişe kaynağıdır. Elektrik, yaşamı, refahı ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek için gereken kritik bir üründür. Günümüzde insanlık, 2030 yılına kadar yeni sürdürülebilir kalkınma hedeflerine (SKH) ulaşmak için önemli bir zorlukla karşı karşıyadır. Sürdürülebilir kalkınma ve enerjiyle ilişkisi, 2002 yılında gerçekleştirilen *Johannesburg Sürdürülebilir Kalkınma Dünya Zirvesinde* önemli bir küresel endişe ve sorun haline gelmiştir. Elektrik üretiminde kullanılacak enerji kaynaklarının karışımında en uygun enerji sistemlerinin belirlenmesi, sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesi için stratejik bir yaklaşım olarak kabul edilir. Elektrik üretim sistemleri, enerji sürdürülebilirliğinin güçlü bir ölçüsü olarak çevresel, ekonomik, sosyal, teknik ve kurumsal sürdürülebilirlikten oluşan beş boyutlu bir yaklaşımla değerlendirilebilir (Şekil 23.39). Enerji geliştirmede sürdürülebilirlik, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımıyla büyük ölçüde gerçekleştirilen teknik sürdürülebilirlik, politik sürdürülebilirlik, sosyal sürdürülebilirlik, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamayı amaçlamaktadır. Enerji

sürdürülebilirliğinin 5 ana boyutu Şekil 1’de gösterilmektedir. Burada enerji sürdürülebilirliğinin, özellikle de elektriğin ana boyutları özetlenmektedir. Enerji geliştirme ve tüketiminde sürdürülebilirliğin ana boyutları çevresel, sosyal, politik, ekonomik ve teknik sürdürülebilirliktir.



Şekil 1. Enerji sürdürülebilirliğinin beş ana boyutu (Kabeyi, 2020)

1. BİYOGAZ ÜRETİMİ VE KULLANIMINDA SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

1.1. Çevresel Sürdürülebilirlik

Biyogaz, ısı ve elektrikte fosil yakıtların yerine geçerek önemli çevresel faydalar sağlar. Sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasının yanı sıra biyogaz, hem yenilenebilir olması hem de hammadde olarak yerel olarak mevcut malzemeleri kullanması nedeniyle enerji güvenliğini garanti eder. Biyogaz üretimi, metanın doğal emisyonunu önleyen kontrollü bir atık ayrıştırması sağlar. Tarımsal ve belediye katı atıkları için yanmaya alternatif bir bertaraf

yöntemidir. Genellikle pahalı olan ve kirletici endüstriyel süreçler kullanılarak üretilen kimyasal gübrelerin yerine gübre olarak kullanılmak üzere yararlı fermente olmuş madde üretir. Bunun hem çevresel hem de sosyoekonomik faydaları bir aradadır. Doğal gaz yerine biyometan kullanımı, doğal gaz şebekelerine sürdürülebilir bir tedarik yolu ve araçlar için bir ulaşım yakıtı ikamesi olabilir.

Biyogaz üretimi, organik atıkların bertarafında uygulanabilir bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu işlem, atmosferdeki karbondioksit yüküne katkıda bulunmaz. Çünkü biyokütle tarafından tüketilen karbondioksit veya açık atık depolarından kaçınılan kaçak metan üretimi tarafından dengelenir. Bu durum, biyogazı "yeşil" sürdürülebilir bir yakıt yapar. Biyogaz, karbondan arındırılmış bir topluma geçişte çok önemli bir işleve sahiptir. Biyogaz üretimi, çöplükleri/atık sistemlerini, çevrenin kalitesini iyileştirir ve hem personel hem de yakındaki kasabalar ve diğer yerleşim yerleri için sağlık risklerini azaltır. Biyogazın çevresel faydaları şu şekilde belirtilebilir:

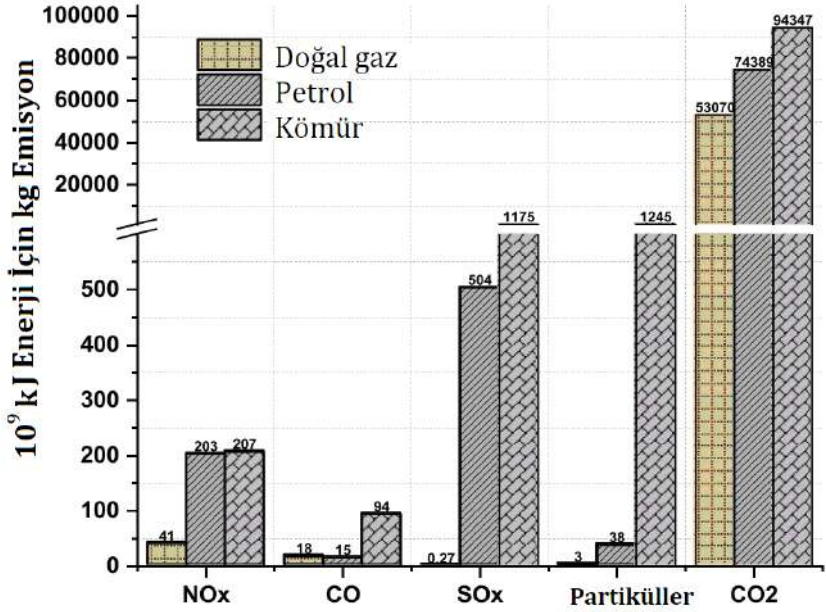
- ✓ Biyogaz, toprak zenginleştirme için sürdürülebilir bir enerji ve gübre kaynağı sağlar ve dolayısıyla fermente edilmiş maddeden sürdürülebilir tarımsal girdiler üretilir.
- ✓ Biyogaz üretimi ve kullanımı, atıkları patojenlerden arındırmak veya sterilize etmek için sürdürülebilir bir yöntemdir.
- ✓ Organik atık geri dönüşümünün ekonomik bir uygulamasıdır. Bertaraf maliyetlerini ve depolama alanları için alan gereksinimlerini en aza indirir.
- ✓ Biyogaz üretimi, esas olarak fosil yakıtların ve yakma tesislerinden çıkan dumanın kullanımından kaçınılması yoluyla sera gazı (GHG) emisyonlarının çevresel etkilerini en aza indirir.
- ✓ Biyogaz, organik çiftlik atıklarına bir bertaraf yolu sağlayarak tarımsal üretimi destekler ve dolayısıyla arazi alanı üzerindeki baskıyı azaltır.

Biyogaz, baş ağrısı, göz enfeksiyonları ve solunum yolu enfeksiyonları gibi duman kaynaklı hastalıklara neden olan kömür ve odun gibi biyokütle kaynaklarının doğrudan yakılmasını önlediği için önemli sağlık yararlarına sahiptir. Biyofermentörlerin kullanımı, biyofermentörlerle tuvalet bağlantısı, durgun ve külsüz yanma ve azaltılmış yanma kazaları yoluyla evlerde sanitasyonu iyileştirir.

Geleneksel yakıt kaynaklarının yanması sonucunda oluşan iç mekan hava kirliliğiyle ilişkili zatürre, akciğer kanseri ve kronik akciğer hastalıklarından dolayı dünya genelinde yılda yaklaşık iki milyon ölüm meydana gelirken, biyogaz bu ölümleri önemli ölçüde azaltacaktır (Mengistu ve Ark., 2015).

Günümüzde, küresel enerji talebinin %80'i fosil bazlı enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır (Oyyuma ve Ark., 2020). Bu durumun başlıca nedenleri yüksek ısı değerleri, bulunabilirlikleri ve kolay erişilebilirlikleridir. Ancak, çevresel bozulma (sera gazı emisyonları yoluyla) ve halk sağlığı endişeleri (hava kirlletici emisyonları) fosil yakıtlarla ilişkili başlıca sorunlardır.

Şekil 2'de, 1 milyar kJ enerji üretimine karşılık gelen hava kirlletici emisyonları açısından iyi bilinen fosil bazlı enerji kaynakları arasında genel bir analiz ve karşılaştırma yapılmıştır. Tüm fosil yakıtlar (doğal gaz, petrol ve kömür) iklim değişikliğinden ve küresel ısınmadan başlıca sorumlu olan NO_x, SO_x ve CO₂ gibi önemli miktarda GHG yayar.



Şekil 2. Fosil bazlı enerji kaynaklarının kirletici emisyonları
(Oyyum ve Ark., 2020)

Birkaç yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı biyoenerji üretmek üzere olgunlaştırılmıştır ve mevcut katkı küresel enerji tüketiminin yaklaşık %10'una karşılık gelmektedir (Oyyum ve Ark., 2020). Biyoenerji kaynaklarının payının, esas olarak yeşil doğaları nedeniyle 2050 yılına kadar %10–50 oranında artacağı öngörülmektedir (Kumar ve Ark., 2018). Tüm yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında biyogaz, enerji politikası yapımcıları, uygulayıcıları ve araştırmacıları tarafından önemli bir biyoyakıt olarak oldukça fazla ilgi görmüştür. Genel olarak biyogaz, çiftlik hayvanı atıklarından, mezbaha atıklarından, belediye atıklarından, mısırdan, kanalizasyon arıtma tesislerinden, otlardan ve farklı organik (karbonhidrat açısından zengin, protein açısından zengin ve yağ açısından zengin) malzemelerden üretilir. Kaynaklarının çeşitliliği ve bolluğu nedeniyle biyogaz, fosil yakıtlara olan bağımlılığın üstesinden gelmek için bir yedek enerji kaynağı olarak hizmet etme konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Biyogaz esas olarak metan (%50–70) ve karbondioksitten (%30–50) ve küçük

miktarlarda su, hidrojen sülfür, hidrojen, nitrojen ve oksijenden oluşur (Yang ve Ark., 2011). Biyogazın bileşimi, hammadde türüne, ilişkili teknolojiye, çevre koşullarına ve işletme değişkenlerine bağlıdır. Biyogazın yakıt veya ana enerji kaynağı olarak kullanımı tamamen bileşimine bağlıdır.

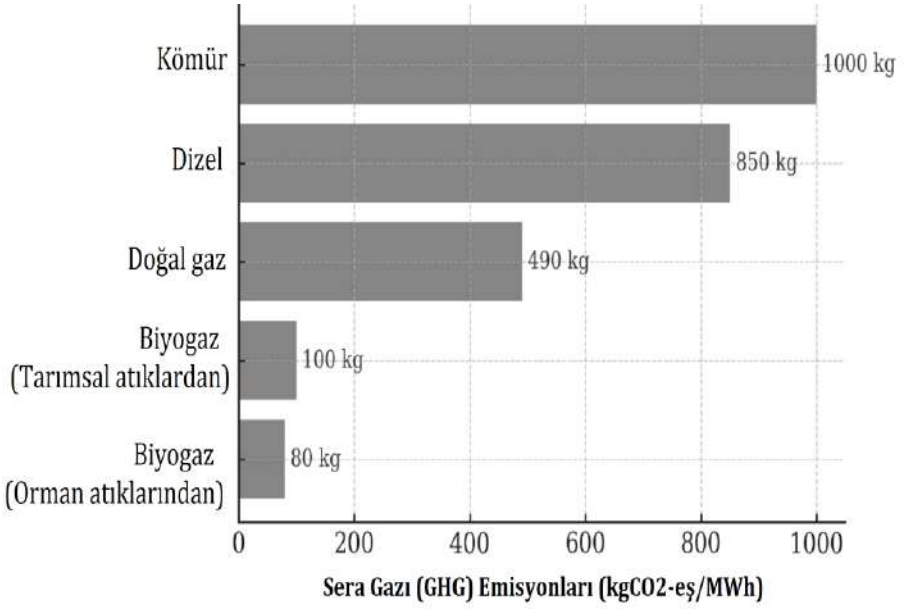
100 yılı aşkın süredir evlerde biyogaz üretimi ve herhangi bir işleme veya arıtma işlemi olmaksızın kullanımı konusunda uzun bir geçmiş vardır. Ancak, biyogaz işleme (temizleme ve yükseltme) için zorunlu bir ihtiyaç vardır. Bu durum onu gaz halindeki araç yakıtı, güç üretim kaynağı ve katma değerli kimyasalların üretimi için hammadde olarak daha uygun bir aday haline getirmek için %97 oranında biyometan üretimiyle sonuçlanır (Zain ve Mohamed, 2018). Biyogaz yükseltmenin (CO_2 giderimi) yanı sıra, iyi bilinen "metanasyon" yoluyla CO_2 'nin CH_4 'a başarılı bir şekilde dönüştürülmesi de biyogazdan biyometan verimini artırmak için araştırılmıştır. %97 oranında metan içeriğine sahip biyogaz (biyometan olarak da adlandırılır), fosil yakıtlarından daha üstün özelliklere sahip olan ve fosil bazlı enerji kaynaklarına olan bağımlılığı azaltabilen tek biyoyakıttır (Ryckebosch ve Ark., 2011). Geleneksel doğal gazın (NG) sıvı formda taşınması, ekonomi ve temizlik açısından uzun mesafeli (3500 km'den fazla) taşımacılık için en umut verici yaklaşım olarak kabul edilir (Watson ve Ark., 2018). Geleneksel NG'ye benzer şekilde, biyometan da sıvı formunda, diğer bir deyişle sıvılaştırılmış biyometan (LBM) olarak, gaz halindeki hacminden yaklaşık 600 kat daha düşük hacimde taşınabilir. LBM üretimi, ön işleme, fermentasyon, biyogaz temizliği, biyometana yükseltme ve sıvılaştırmayı içeren çok aşamalı bir süreçtir.

1.1.1. Çevresel Etkiler, Sosyoekonomik Fırsatlar Ve Uygulama Çerçevesi

Çevresel etkinin önemini dikkate alarak tarımsal ormancılık atıklarından üretilen biyogaz, olumlu çevresel ve sosyoekonomik etkilere sahip yenilenebilir bir enerji alternatifi sunmaktadır. En önemli fayda, fosil yakıtların yerini alarak sera gazı (GHG)

emisyonlarının azaltılmasıdır. Biyogaz, geleneksel sobalarda kullanılan doğal gazın, dizelin veya hatta yakacak odunun yerini alabilir, CO₂, CH₄ ve NO_x emisyonlarını azaltabilir. Merkezi olmayan sistemlerde enerji üretimiyle ilişkili emisyonları %80 oranına kadar azaltabilir (IRENA, 2021). Ayrıca, organik atık yönetimi daha sürdürülebilir hale gelir. Çünkü tarımsal ormancılık kalıntıları yakılmak veya terk edilmek yerine anaerobik fermentasyon yoluyla değerlendirilir. Benzer şekilde, üretilen fermentasyon ürünü organik gübre olarak kullanılabilir, besin döngüsü kapatılabilir ve sentetik gübrelere olan bağımlılık azaltılabilir. Şekil 3’de, üretilen MWh başına kilogram CO₂ eşdeğeri biriminden ifade edilen yakıt türüne göre sera gazı (GHG) emisyonlarını gösteren bir karşılaştırma yapılmıştır. Tarımsal üretim ve orman atıklarından üretilen biyogaz, geleneksel fosil yakıtlara kıyasla önemli ölçüde daha düşük emisyonlara sahiptir.

Fosil yakıtlardan biyogaz gibi yenilenebilir biyoenerji kaynaklarına geçiş, küresel sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltmaya yönelik önemli bir aşamayı temsil eder. Kömür, dizel ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar, çıkarılmaları, işlenmeleri ve yanmaları sırasında önemli miktarda sera gazı (GHG) yayar. Buna karşılık, tarımsal üretim ve orman kalıntılarından elde edilen biyogaz önemli ölçüde daha düşük emisyonlar sunar. Bunun nedeni hem anaerobik fermentasyon sırasında CH₄’ın (güçlü bir sera gazı) yakalanması hem de ayrışma sırasında emisyon salacak olan organik atıkların geri dönüştürülmesidir. Veriler, fosil yakıtların biyogazla değiştirilmesinin, hammaddeye ve sistem verimliliğine bağlı olarak sera gazı (GHG) emisyonlarında %90 oranına kadar azalmalar sağlayabileceğini vurgulamaktadır (Uranga-Valencia ve Ark., 2025).



Şekil 3. Yakıt türüne göre sera gazı (GHG) emisyonları (UNEP, 2024)

Sosyoekonomik açıdan bakıldığında, etkiler eşit derecede önemlidir. Kırsal alanlarda, biyogaz üretimi temiz ve uygun fiyatlı enerji, biyogübreler ve hasat, sistem işletimi ve bakımında yerel istihdam fırsatları sunar. Bu durum, enerji güvenliğini güçlendirmeye, toprak kalitesini iyileştirmeye ve yerel ekonomik kalkınmayı teşvik etmeye katkıda bulunur. Bu faydaları nesnel olarak değerlendirmek için ekolojik ayak izi, net sera gazı (GHG) azaltımı, sistem enerji verimliliği ve toplum refahı gibi sürdürülebilirlik göstergeleri kullanılır. Çalışmalar, iyi uygulanan biyogaz sistemlerinin geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük bir karbon ayak izine sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu faydalar bir araya geldiğinde, biyogazı sadece bir enerji geçiş teknolojisi olarak değil, aynı zamanda tarımsal üretim ve orman ortamlarında sürdürülebilir kalkınma için ayrılmaz bir araç olarak konumlandırır.

Biyogazın, özellikle kırsal ve kent çevresindeki alanlarda sürdürülebilir kalkınmayı yönlendirebilecek çok çeşitli sosyoekonomik fırsatlar sunduğu ve diğer üretken sektörlerle

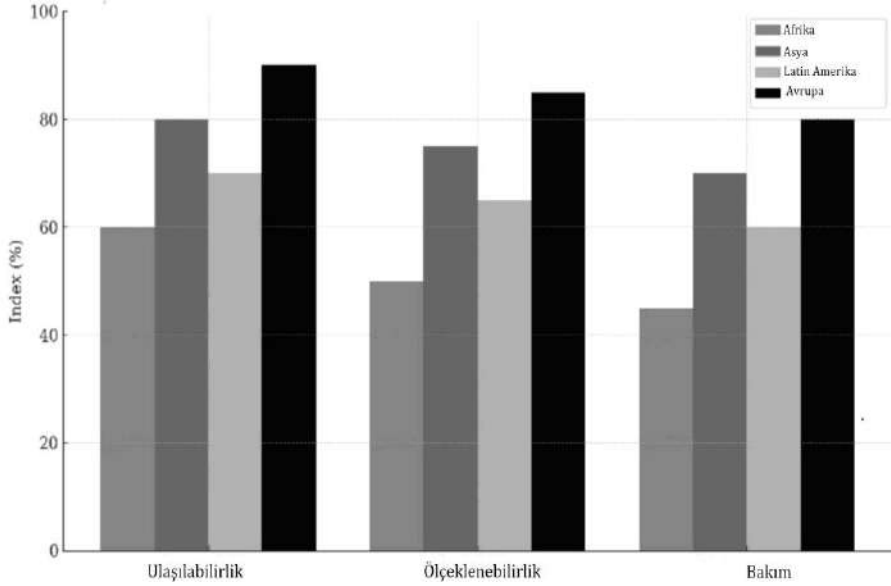
entegrasyon potansiyeline ek olarak, bu fırsatlar teknolojik, ekonomik, politik ve sosyal olmak üzere dört ana boyutta çerçevelenmiştir.

1.1.1.1. Teknolojik Fırsatlar: Erişilebilirlik, Ölçeklenebilirlik Ve Bakım

Anaerobik fermentasyon teknolojileri önemli ölçüde ilerlemiş ve küçük aile biyofermentörlerinden endüstriyel tesislere kadar farklı ölçeklere uyarlanmalarına olanak sağlamıştır. Bu teknolojiler giderek daha erişilebilir ve farklı iklim ve sosyoekonomik koşullara uyarlanabilir hale gelmiştir. Ayrıca, bu teknolojilerin çoğu yerel bakımı kolaylaştırmak için basitleştirilmiş ve sınırlı teknik seviyelere sahip kırsal topluluklar tarafından benimsenmelerine olanak sağlanmıştır. Sistemlerin modülerliği atık mevcudiyetine ve enerji talebine göre ölçeklendirilmelerine olanak tanır. Bu durum, özellikle sürdürülebilir enerji çözümlerine erişimin sınırlı olduğu kırsal alanlarda önemlidir.

Dünyanın dört bölgesi (Afrika, Asya, Latin Amerika ve Avrupa) biyogaz teknolojilerinin tahmini erişilebilirlik, ölçeklenebilirlik ve bakım seviyeleri açısından Şekil 4’de karşılaştırılmaktadır. Bu boyutlar, tarımsal ve ormancılık kalıntılarına dayalı biyofermentörlerin ve anaerobik fermentasyon sistemlerinin benimsenme potansiyelini değerlendirmek için önemlidir Afrika, altyapı ve eğitilmiş insan kaynaklarındaki kısıtlamalar nedeniyle özellikle teknik bakımda orta ile yüksek engeller sunmaktadır. Bu koşullar, kırsal Afrika bölgelerinde biyogazın sınırlı genişlemesine ilişkin çeşitli raporlarda belgelenmiştir (REN21, 2022). Çin ve Hindistan gibi ülkelerin kırsal biyogaz teknolojilerindeki liderliği sayesinde Asya, özellikle erişilebilirlik ve ölçeklenebilirlik açısından yüksek düzeyde uygulama göstermektedir. Bu genişleme kamu politikaları ve hükümet teşvikleriyle kolaylaştırılmıştır (IRENA, 2022). Latin Amerika, işbirliği ajansları ve bölgesel çalışmalar tarafından yönetilen girişimlerde belirtildiği gibi, orta düzeyde teknolojik gelişme ve artan yatırımla elverişli bir bağlama sahiptir. Ancak yine de topluluk sistemlerini sürdürmede zorluklarla karşı

karşıyadır (FAO, 2021). Avrupa, olgun teknolojik ağlar, güçlü kurumsal destek ve yerleşik biyoenerji pazarlarıyla her üç alanda da öncülük etmektedir. Bölgede, sağlam düzenleyici çerçeveler ve sertifikasyon şemaları aracılığıyla biyogaz kullanımını teşvik edilmiştir (REN21, 2022).

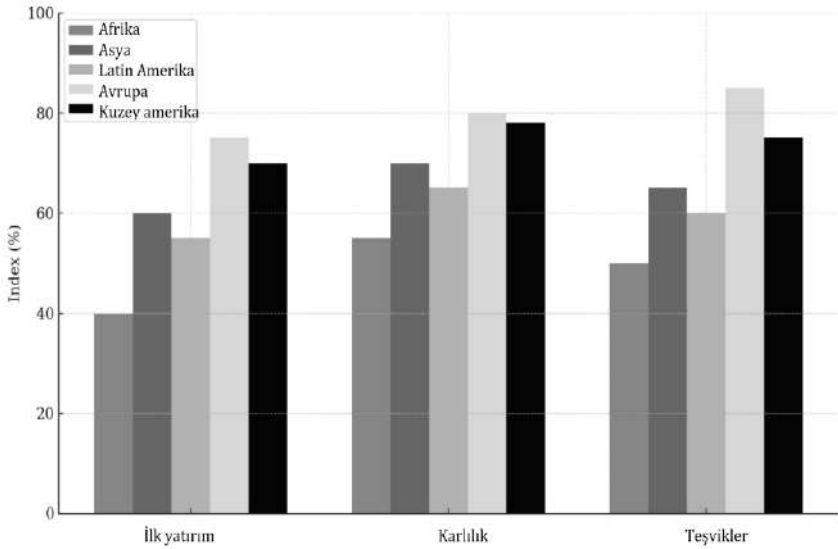


Şekil 4. Dünyanın dört bölgesinin (Afrika, Asya, Latin Amerika ve Avrupa) biyogaz teknolojilerinin tahmini erişilebilirlik, ölçeklenebilirlik ve bakım yüzdeleri açısından karşılaştırılması (Uranga-Valencia ve Ark., 2025)

1.1.1.2. Ekonomik Fırsatlar: İlk Yatırım, Karlılık ve Sübvansiyonlar

Ekonomik bakış açısından, ilk yatırım özellikle düşük gelirli bağlamlarda zorlayıcı olabilir de, birkaç çalışma biyogaz sistemlerinin orta vadede karlı olduğunu göstermiştir. Özellikle de fermentasyon atıklarının gübre olarak kullanılması, enerji maliyetlerinin azaltılması ve atık kullanımı gibi faydalar dikkate alındığında bu sonuca ulaşılabilir. Ayrıca, birkaç ülke bu teknolojilerin benimsenmesini sağlamak için sübvansiyonlar, vergi teşvikleri ve yeşil finansman programları sunmaktadır (FAO, 2021).

Biyogaz gelişimi için üç temel ekonomik faktör olan ilk yatırım, karlılık ve sübvansiyon mevcudiyeti açısından dünyanın beş bölgesi Şekil 5’de karşılaştırılmıştır. Her faktör bir indeks (0-100) olarak ifade edilir ve daha yüksek değerler o alanda daha iyi performansı veya daha fazla desteği temsil eder. "İlk yatırım", biyogaz sistemlerini uygulamak için gereken sermayeyi ifade eder. Daha düşük puanlara sahip bölgeler (örneğin Afrika), altyapı veya krediye erişim eksikliği nedeniyle daha büyük finansal engellerle karşı karşıyadır (FAO, 2021). Maliyet etkinliği, enerji tasarrufları ve yan ürünler (biyogübreler gibi) dahil olmak üzere operasyonel getirileri dikkate alır. Avrupa ve Kuzey Amerika, olgun pazarlar ve döngüsel ekonomi politikalarıyla entegrasyon sayesinde bu kategoriye öncülük eder (IEA, 2023). Sübvansiyonlar, mevcut hükümet veya kurumsal desteği yansıtır. Güçlü yenilenebilir enerji teşvikleri ve emisyon azaltma hedefleri tarafından yönlendirilen Avrupa en yüksek değere sahiptir (IRENA, 2022).

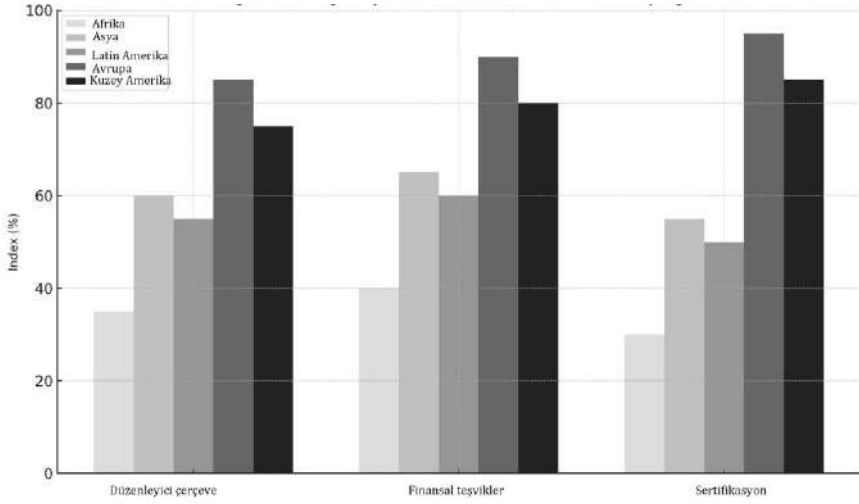


Şekil 5. Biyogaz gelişimi için üç temel ekonomik faktör açısından dünyanın beş bölgesinin (Afrika, Asya, Latin Amerika, Avrupa ve Kuzey Amerika) karşılaştırılması (Uranga-Valencia ve Ark., 2025)

1.1.1.3. Politik Fırsatlar: Düzenleyici Çerçeve, Teşvikler Ve Sertifikalar

Politik düzeyde, biyogaz projelerinin başarısı için net bir düzenleyici çerçeve esastır. Bazı ülkeler, biyogazı temiz bir enerji kaynağı ve enerji dönüşümünün temel bir parçası olarak tanıyan belirli düzenlemeler, teşvikler ve sertifika programları geliştirmiştir. Bu enerji standartlarının uygulanması, ekonomik destek, besleme tarifeleri ve elverişli çevre düzenlemeleri gibi destekler yoluyla sektörün büyümesini kolaylaştırmıştır (IEA, 2025). Örneğin, Avrupa Birliği biyogazı döngüsel ekonomi ve kırsal enerji stratejisine dahil etmektedir (EC, 2018). Bir diğer strateji ise türetilmiş ürünlere değer katan, ticarileşmelerini ve uzmanlaşmış pazarlarda kabul görmelerini kolaylaştıran sürdürülebilirlik sertifikalarıdır. Dünyanın beş bölgesi biyogazla ilgili politik faktörler bakımından Şekil 6'da karşılaştırılmıştır.

Bu faktörler biyogaz teknolojilerinin yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmak için kritik öneme sahiptir ve tahmini endeksler (0-100) olarak ifade edilir. Düzenleyici çerçeveler, ulusal veya bölgesel yasalar, çevre düzenlemeleri ve biyogaz sistemlerini yöneten izin prosedürlerini içerir. Avrupa, AB Yenilenebilir Enerji Direktifi (IRENA, 2022) gibi güçlü ve uyumlu politikalarla öncülük etmektedir. Teşvikler arasında sübvansiyonlar, besleme tarifeleri, vergi kredileri veya benimsemeye yönelik finansal engelleri azaltan kamu-özel finansman planları yer almaktadır. Avrupa ve Kuzey Amerika güçlü finansal teşvikler sunarken, Afrika hala önemli boşluklarla karşı karşıyadır (IEA, 2025). Sertifikasyonlar, biyogaz sistemlerinde kalite, sürdürülebilirlik ve güvenlik standartlarına uyumu garanti eder. Bunlar, yenilenebilir enerji hedefleri ve karbon kredisi piyasalarıyla bağlantılı oldukları Avrupa ve Kuzey Amerika'da en çok gelişmiştir (REN21, 2022). Şekil 6'da gösterildiği gibi, daha az gelişmiş bölgelerde biyogaz potansiyelini açığa çıkarmak ve küresel olarak sürdürülebilir enerji geçişlerini desteklemek için stratejik iyileştirmelerin nerede gerekli olduğunu görmek mümkündür.



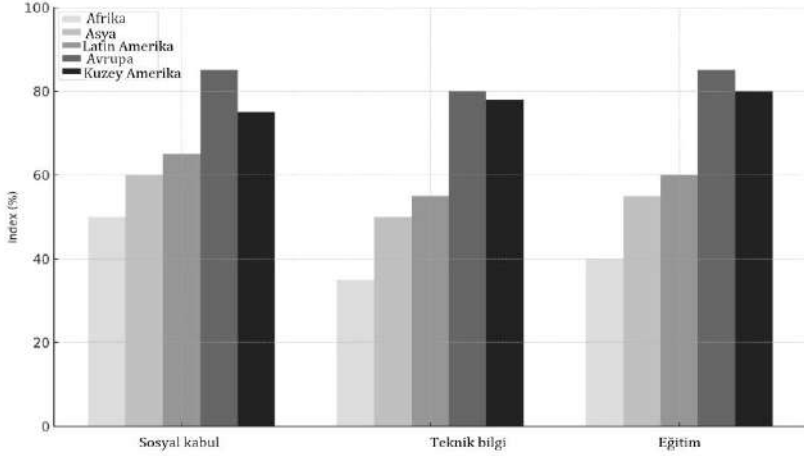
Şekil 6. Düzenleyici çerçeve, finansal teşvikler ve sertifikasyon mekanizmaları olmak üzere üç temel bileşene dayalı dünyanın beş bölgesindeki biyogazla ilgili politika faktörleri (Uranga-Valencia ve Ark., 2025)

Biyogaz üretiminin yarısından fazlası, tahmini hacmi 215 TWh olan birkaç Avrupa ülkesinde yoğunlaşmıştır ve yaklaşık %25'i 87 TWh ile Çin'de bulunmaktadır (EEAOC, 2023). Ayrıca, biyogazdan küresel elektrik üretim kapasitesi 2000 yılında 2455 MW idi ve sonraki yirmi yılda, biyogaz tesislerinde önemli bir artış olmuş ve 2020 yılında 20 150 MW kurulu kapasiteye ulaşılmıştır (IRENA, 2022). Almanya, ABD, İngiltere, İtalya, Çin, Fransa ve Brezilya, dünyadaki biyogaz elektrik üretim tesislerinin %73,8'ini yoğunlaştıran yedi ülkedir (Uranga-Valencia ve Ark., 2025).

1.1.1.4. Sosyal Fırsatlar: Kabul, Teknik Bilgi Ve Eğitim

Sosyal düzeyde, biyogazın toplum tarafından kabulü, farkındalık yaratma ve teknik eğitim eşliğinde olduğunda olumlu olma eğilimindedir. Teknolojinin toplum tarafından sahiplenilmesi, büyük ölçüde son kullanıcıların faydaları, bakımı ve ekonomik potansiyeli hakkındaki bilgisine bağlıdır. Son kullanıcıları sistem tasarımı ve işletimine dahil eden katılımcı uygulama programlarının uzun vadede daha sürdürülebilir ve dayanıklı olduğu kanıtlanmıştır. Bu durum,

teknik eğitim ve yerel kapasite geliştirme programları için fırsatlar yaratır (Şekil 7), bir sahiplik duygusunu teşvik eder ve sistemin düzgün çalışmasını sağlar.



Şekil 7. Sosyal kabul, teknik bilgi ve eğitim ve öğretim olmak üzere üç gösterge üzerinden dünyanın farklı bölgelerinde biyogaz sistemlerinin benimsenmesini ve sürdürülebilirliğini etkileyen başlıca sosyal faktörler (Uranga-Valencia ve Ark., 2025)

Sosyal kabul, toplum desteğini, kamu algılarını ve biyogaz teknolojisini benimseme isteğini yansıtır. Kamu farkındalığı programlarının en aktif olduğu Latin Amerika ve Avrupa’da en yüksek olma eğilimindedir (FAO, 2021). Teknik bilgi, eğitimli profesyonellerin mevcudiyetini ve biyogaz sistemlerine aşinalık düzeyini içerir. Avrupa ve Kuzey Amerika daha yüksek değerler gösterirken, Afrika hala önemli kapasite boşluklarıyla karşı karşıyadır. Eğitim ve öğretim, çiftçileri, teknisyenleri ve yerel paydaşları hedefleyen resmi ve gayri resmi girişimleri kapsar. İnsan sermayesine yatırım, Avrupa ve Asya’da biyogazın başarısı için anahtar olmuştur (IRENA, 2022). Bu sonuçlar, özellikle düşük gelirli bölgelerde, biyogaz projelerinin başarısı için eğitim, farkındalık ve toplum katılımının iyileştirilmesinin önemli olduğunu göstermektedir.

1.2. Biyogazdan Elektrik Ve Yakıt Üretiminin Teknik Sürdürülebilirliği

Daha önce atık olarak kabul edilen endüstriyel süreçlerden, insan faaliyetlerinden, ürün yetiştiriciliğinden, hayvancılıktan ve ürün işlemeden kaynaklanan aşırı organik biyolojik olarak ayrışabilir malzeme akışları mevcuttur. Bu atık akışları mevcut biyogaz teknolojisiyle kolayca biyogaza ve biyometana dönüştürülebilir. Bu atıklar biyogaz fermentörlerine yönlendirilebilir ve yararlı enerjiye dönüştürülebilir. Biyogaz, yemek pişirme, aydınlatma, soğutma, motor yakıtı ve evsel ve endüstriyel uygulamalar ile ısı uygulamaları için gaz şebekesi temini gibi geniş uygulamalara sahiptir.

Yakıt olarak biyogaz, yakacak odun ve inek gübresinden daha verimlidir. Diğer bir deyişle, yakacak odun kullanımında sadece %5–8 düzeyinde olan verime kıyasla, yaklaşık %60 verimlilikle yanan kırsal ev enerjisi kullanımı için daha iyi bir seçimdir. Gübre ise yakacak odun veriminin yaklaşık %60'ı kadar verimlilikle yanar (Kabeyi ve Olanrewaju, 2022). Biyogaz ayrıca güvenilir bir elektrik kaynağı ve ulaşım yakıtı sunar ve elektriğe ihtiyaç duyan su pompalama gibi birçok önemli işlemde kullanılabilir. Biyometan, birçok evsel ve endüstriyel uygulamada doğal gazın doğrudan bir ikamesi olarak kullanılabilir. Bu durum, biyometanı doğal gaza teknik olarak uygulanabilir bir alternatif haline getirebilir. Biyogaz fermentörlerden gelen biyogübre, taze gübreden yaklaşık %10 oranında daha fazla amonyak içeriğine sahip, daha ucuz alternatif gübre tedarik ederek sürdürülebilir tarımı ve geçim kaynaklarını destekler (Kabeyi ve Olanrewaju, 2022). Biyobulamaç, geleneksel gübreden daha az viskoz ve daha az topaklı olduğu için taze gübreden çiftliğe ve ürünlere uygulanması daha kolaydır. Ayrıca en pahalı gübre olan fosfor ve potasyum açısından da daha zengindir. Biyogaz teknolojisi ayrıca mühendisler, tarımcılar, inşaat teknisyenleri ve tesis tasarımcıları gibi çeşitli profesyoneller için hem yetenekli hem de yeteneksiz kişiler için iş fırsatları yaratır. Tüm bunlar bir araya geldiğinde biyogaz enerjisini yenilenebilir ve teknik olarak sürdürülebilir bir duruma getirir.

Biyogaz teknolojisinin gelişmesi ve yayılması, başarı ve başarısızlık açısından karışık sonuçlarla karşılaşmıştır. Biyogaz tesislerinin işletilmesi ve bakımı için teknik gereksinimler, gelişmekte olan ülkelerin birçok kırsal alanında nadir olabilecek yetenekli personel ve becerilerin eğitimini ve mevcudiyetini gerektirir. Bu durum, sürdürülebilirliğin eksikliğinin bir göstergesi olan birçok biyosfermentörün operasyonel başarısızlığına neden olmuştur. Biyogaz teknolojisine yatırımı teşvik etmek için genellikle biyogazdan üretilen elektrik için cazip elektrik besleme tarifeleri, yatırım indirimleri, vergi teşvikleri ve biyogaz teknolojisine yatırımı teşvik etmek için hibeler gibi önlemlerle devlet teşvikleri gerekir. Bu tür teşvik önlemleri, başarılı bir biyogaz endüstrisine sahip olan Hindistan, Çin ve Almanya'da başarıyla denenmiştir. Verimli biyogaz üretimi ve dönüşüm teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar, biyogaz teknolojisinin gelecekteki başarısının ve sürdürülebilirliğinin de anahtarını elinde tutar. Bu teknolojiler arasında biyometan üretimi, biyogaz yakıt hücreleri ve biyogazdan hidrojene dönüşüm yer alır.

Biyogaz sistemlerinin genel sürdürülebilirliği, elektrik üretimi, gübre üretimi, biyoyakıt üretimi ve trijenerasyon gibi çeşitli uygulamalarla artırılacaktır. Bunlar sistemleri ekonomik, daha temiz, teknik olarak sürdürülebilir ve daha geniş bir adaptasyon için sosyal olarak kabul edilebilir hale getirecektir. Ancak geri ödeme süreleri genellikle 1,5–2,5 yıldır. Bu durum, biyogaz elektriğini, biyometan için şebeke elektriğinin ve tüp lenmiş LPG'nin fiyatına benzer hale getirir (Kabeyi ve Olanrewaju, 2022).

1.2.1. Biyogazdan Elektrik Üretiminde Ekonomik Sürdürülebilirlik

Geleneksel elektrik üretim kaynakları, yakıt fiyatı ve tedarik dalgalanmaları, hidroelektrik için yağışın mevsimsel değişkenliği ve rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarının sürekli elektrik kesintisi aralıklılığı riski ile düşük elektrik tedarik güvenilirliği, jeotermal için kıtlık ve uzun proje teslim süreleri ve düşük karbonlu nükleer santral üretimiyle ilişkili yüksek güvenlik ve riskler gibi zorluklarla karşı

karşıyadır. Biyogazdan elektrik üretiminin ekonomik ve finansal sürdürülebilirliği için önemli ekonomik göstergeler şunlardır (Barragán-Escandón ve Ark., 2020):

- Karlılık
- Yatırım maliyetleri
- Üretim maliyeti
- Besleme tarifeleri
- Elektrik satış fiyatı
- İşletme ve bakım maliyetleri
- Net şimdiki değer (NPV)
- İç karlılık oranı (IRR)
- Dengelenmiş enerji maliyeti (LCOE)
- Geri ödeme süresi

İşletme ve bakım maliyetleri teknik veya mühendislik personeli, hammadde maliyeti ve diğer temel enerji santrali hizmetleriyle ilişkilidir. Bu maliyet unsurları, proje yatırım maliyetine göre değerlendirilebilen sabit ve değişken maliyetler olarak sınıflandırılır. Biyogaz için, tesis işletme ve bakım maliyetleri genellikle toplam yatırımın %7,4'ü olarak alınır (Barragán-Escandón ve Ark., 2020). Dengelenmiş güç maliyeti, farklı enerji üretim teknolojilerinin ekonomik uygulanabilirlik açısından karşılaştırılmak amacıyla ölçüt olarak kullanılır. *Dengelenmiş elektrik maliyeti*, tesisin ömrü boyunca elektrik üretim maliyetini (USD/kWh) ifade eder. Yatırım maliyeti, faiz ve elektrik altyapısı dahil tüm yardımcı ekipmanların toplam maliyetini içerir ve USD/kWh olarak verilir. İşletme ve bakım maliyeti bir yıllık olarak bekirtilir. Dengelenmiş maliyetin (USD/kWh) hesaplanmasında kullanılan süre ise, santralin faydalı veya tasarım ömrüdür. *İç karlılık oranı* (IRR), nicel bir ölçüdür ve bir yatırımcının minimum riskle ödemeye hazır olduğu en yüksek faiz oranını belirtir. *Geri ödeme süresi* (PBP), proje maliyetinin tamamen geri kazanıldığı süredir.

Biyogazdan elektrik üretmek, elektrik maliyetlerini azaltabilir ve özellikle biyokütle kaynağının bol ve ucuz olduğu yerlerde birçok

şeye erişimi artırabilir. Elektrik erişimi, insanların yaşam kalitesindeki genel iyileşmeyle doğrudan ilişkilidir. Birçok kişi için yerel olarak mevcut bir kaynak olan biyogaz, güvenli bir enerji kaynağı olarak çoğunluğun sosyoekonomik refahının iyileştirilmesinde öncü bir rol oynayabilir.

1.2.2. Biyogazdan Elektrik Üretiminde Sosyal Sürdürülebilirlik

Biyogaz teknolojisinin başlıca sosyal etkisi, yetenekli ve yeteneksiz kişiler için istihdam fırsatları yaratmasıdır. Belirli yetenekli meslekler arasında tesisatçılar, inşaat mühendisleri ve tarımcılar iyi organize edilmiş bir biyogaz geliştirme programında istihdam edilirler. Biyogaz ekipmanlarının ve cihazlarının tasarımı, üretimi, işletimi ve bakımı ile inşaatında daha fazla istihdam fırsatı yaratılır. Aktif bir biyogaz geliştirme girişimi, araştırmacıları biyogaz tedarik zincirine tam olarak dahil etmenin yanı sıra, daha fazla sosyal fayda sağlayan yeni ürünlere ve verimli sistemlere dönüştüren araştırma ve geliştirme faaliyetlerini de teşvik edecektir. İstihdam açısından, Çin’de biyogazla ilgili işlerde doğrudan veya dolaylı olarak çalışan 90 000’den fazla kişi bulunurken, Almanya ve Hindistan’da sırasıyla 85 000 ve 50 000 kişi bulunmaktadır (Kabeyi ve Olanrewaju, 2022).

Biyogaz kullanımı, komşular arasında çatışma kaynağı olabilen ve dolayısıyla sosyal ilişkileri ve refahı olumsuz etkileyebilen organik atıkların çevresel etkisini en aza indirir. Çoğu gelişmekte olan ülkenin kırsal kesimlerindeki kadınlar ve çocuklar, karbon döngüsünün kritik bir unsuru olan ormanlar kömür yakmak ve yakacak odun hasadı için temizlenirken, yakacak odun aramak için uzun süreler harcamaktadırlar. Parlak biyogaz lambası ışığının kullanımı, çalışmalarını ve ödevlerini yapmak için uygun fiyatlı temiz bir ışık kaynağına sahip olabilen okul çocukları için doğrudan bir destektir (Mengistu ve Ark., 2015).

Biyogazın diğer sosyoekonomik faydaları şunlardır:

- ✓ Yakıt kaynaklarına yapılan harcamalardan tasarruf sağlar.

- ✓ Diğer gelir getirici faaliyetlerde kullanılmak üzere zamandan tasarruf sağlar.
- ✓ Toprak verimliliğini artırır.
- ✓ Biyo bulamaç kullanımı nedeniyle kimyasal gübre tüketimini azaltır.
- ✓ Duman kaynaklı hastalıklarla ilgili sağlık harcamalarının azaltılmasına yardımcı olur.
- ✓ Biyogaz sektörü, yerel nüfusa ve hanelere doğrudan ve dolaylı iş fırsatları yaratır.

Genel olarak, biyogazın sosyal kabulü genellikle olumsuz çevresel ve sağlık endişelerinden etkilenir. Biyogaz kullanımıyla üretilen başlıca sera gazları (GHG), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksittir (N₂O).

1.3. Biyogaz Enerjisinin Kurumsal Ve Politik Sürdürülebilirliği

Biyogaz üretimini ve kullanımını teşvik etmek için kurumsal ve politika çerçevesi geliştirmeye ihtiyaç vardır. Ülkeler, vergi muafiyetleri ve biyogaz araştırma ve geliştirmeyi teşvik etme gibi vergi önlemleri yoluyla biyokütle ve biyoatıktan büyük ölçekli ve küçük ölçekli üretim yakıtlarını teşvik edebilirler. İyi bir örnek olarak, Almanya, 4 TWh kurulu elektrik kapasitesine sahip 8000'den fazla biyogaz tesisiyle Avrupa'nın önde gelen biyogaz üreticilerinden biridir (Kabeyi ve Olanrewaju, 2022). Bir başarı öyküsü olarak, dünya 2010 yılında küresel bir ekonomik krizle karşı karşıya kalırken, biyogaz üretimi hızla genişlemiş ve biyogazın yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanımını teşvik etmeye yönelik kasıtlı bir hükümet politikası nedeniyle Almanya'da kırsal ekonomik kalkınmaya katkıda bulunmuştur.

2. SONUÇ

Biyogaz ham haliyle kullanılır veya biyometana yükseltilir. Biyogaz doğrudan yemek pişirme, aydınlatma ve güç üretimi için kullanılabilir. Yakıt olarak yükseltilmiş biyogaz/biyometan, metanol

yakıtını işlemek için de kullanılabilir. Sıkıştırılmış biyogaz (CBG) ve sıvı biyogaz (LBG), yakıt ve güç üretimi olarak çeşitli doğrudan ve dolaylı uygulamalar için biyometandan geri dönüşümlü olarak üretilir. Biyogaz, biyogazdan kombine ısı ve güç üretimi (CHP), biyo-CNG'ye sıkıştırma ve temizlenmiş biyogaz/biyometan için biyo-LPG gibi işlemlerde kullanılabilir. Yakıtlar, biyogazdan temizleme, saflaştırma ve sentez gazına dönüştürülmeden önce ve benzin yapmak için kullanılabilen metanol üretmek için kısmi oksidasyon yoluyla üretilir. Sentez gazı, *Fischer-Tropsch* işlemi yoluyla alkol, jet yakıtı, dizel ve benzin üretiminde kullanılır.

Metan toksik etkili değildir. Ancak iyi işlenmezse boğulma yoluyla ölüme neden olabilir. Bu nedenle, biyogaz dikkatli bir şekilde işlenmelidir. Metan aynı zamanda bir sera gazıdır ve karbondioksitten 20 kat daha güçlüdür. Bu durum, kazalar veya kontrolsüz anaerobik fermentasyondan kaynaklanan emisyonlar yoluyla sızıntıların sürdürülebilirlik değerlendirmesinde ihmal edilemeyecek önemli bir çevresel etkiye sahip olduğu anlamına gelir.

Biyogaz ayrıca kimyasal yakıtların ve hidrojen ve metanol gibi maddelerin üretiminde de kullanılabilir. Bunlar metanol-benzin işlemi yoluyla benzine işlenebilir. Yakıt üretiminin yanı sıra, biyogaz ayrıca üretim süreci ciddi çevresel etkilere yol açacak kimyasalların üretimi için bir hammadde olarak da kullanılabilir. Olumsuz tarafı, biyogazın yakıt olarak kalitesini azaltan hidrojen sülfür ve karbondioksit gibi eser elementlere sahip olmasıdır. Ek olarak, biyogaz yükseltmesinden elde edilen biyometanın yüksek işletme maliyetleri ve değerlendirilmesi gereken enerji tüketimi vardır.

İyi tasarlanmış ve inşa edilmiş biyogaz fermentörleri ve daha geniş uygulamalar ve verimli biyogazdan elektrige, biyogazdan ısıya ve biyogazdan katma değerli kimyasallara ve ürünlere dönüşüm, biyogazın enerji dönüşümünde öncü ve sürdürülebilir bir rol oynamasını sağlamak için bir araya gelecektir. Biyogazdan elde edilen elektrik doğrudan kullanılabilir. Bu durum şebekeden elektrik ithalatını önler veya sınırlarken, üretilen fazla elektrik, gaz türbinleri ve içten yanmalı motorlar gibi çeşitli birincil hareket üniteleri

kullanılarak elektrik şebekesine ihraç edilebilir. Yakıt hücrelerinde biyogazdan elektriğe doğrudan dönüşüm yapmak da mümkündür. Biyogaz ayrıca geniş yenilenebilir uygulamalar için hidrojen yakıtına dönüştürülebilir.

Isı ve elektrik üretiminde biyogaz kullanımı için değişen özelliklere ve süreçlere sahip çeşitli dönüşüm teknolojileri mevcuttur. Bu teknolojilere kojenerasyon, trijenerasyon sistemleri ve açık dönüşüm sistemleri dahildir. Kullanılan cihazlar veya ekipmanlar arasında dizel motorlar, benzinli motorlar, gaz türbinleri, yakıt hücreleri ve *Stirling* motorları yer alır. Diğer çoklu uygulamalar için uygulanabilir enerji ürünleri arasında biyometan ve hidrojen yakıtları bulunur.

Biyogaz, tüm antropojenik GHG emisyonlarının yaklaşık %14'ünü oluşturan ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonları azaltmak için çift yönlü bir rol oynar. Biyogaz veya biyometan, ulaştırmada fosil yakıtların yerine doğrudan yakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca jet yakıtı, dizel ve benzin üretmek için *Fischer-Tropsch* (FT) işlemi ve yakıt hücrelerinde yakıt olarak kullanılabilen ve kimyasal ikamelerin yanı sıra çok düşük karbon değerine sahip doğrudan yanma yakıtı olarak kullanılabilen hidrojen ve metanol üretmek için reformlama işlemleri gibi işlemlerle biyoyakıt/kimyasal üretmek için kullanılabilir. Biyogazdan üretilen ulaştırma yakıtlarının emisyonları çok düşüktür. Bazı durumlarda negatif karbon değerine sahiptir.

Biyogazın daha az çevresel etkisi olmasına rağmen, yine de çoğunlukla CO₂, CH₄ ve N₂O olmak üzere bazı GHG emisyonlarıyla ilişkilidir. İlişki seviyesi kullanılan teknolojiye veya biyogaz kaynağına bağlıdır. Bu nedenle, biyogazın sürdürülebilir enerji dönüşümündeki olumlu rolü, kullanılan dönüşüm teknolojisinin seçimine ve biyogaz kaynağına bağlıdır. Afrika gibi gelişmekte olan ülkelerde biyogazdan elektrik üretimi oldukça sınırlıdır. Anaerobik fermentasyon, kullanılan yan ürünleri üretmek ve dolayısıyla biyogaz üretiminin olumsuz çevresel etkisini ve kirlilik potansiyelini azaltmak için kullanılır. Anaerobik fermentasyonun bireyler, insan çevresi ve tüm toplum için çeşitli faydaları vardır.

KAYNAKLAR

Barragán-Escandón, A., Olmedo Ruiz, J.M., Curillo Tigre, J.D., Zalamea-León, E.F. “Assessment of power generation using biogas from landfills in an equatorial tropical context,” Sustainability, vol. 12, no. 7, p. 2669, 2020.

EC (2018). European Commission. 2018. Available online: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/edace3e3-e189-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en> (accessed on 7 April 2025).

EEAOC (2023). Available online: <https://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2023/07/Estado-de-situacion-y-potencial-de-produccion-de-biogas.pdf> (accessed on 27 May 2025).

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2021. Available online: <https://www.fao.org/3/ca9473en/CA9473EN.pdf> (accessed on 24 March 2025).

IEA. 2025. Available online: <https://www.iea.org/policies> (accessed on 7 April 2025).

IEA. 2023. Available online: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/special-section-biogas-and-biomethane> (accessed on 7 April 2025).

IRENA (International Renewable Energy Agency). 2021. Available online: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Nov/IRENA_FAO_Renewables_Agrifood_2021.pdf (accessed on 22 March 2025).

IRENA. (International Renewable Energy Agency). 2022. Available online: <https://www.irena.org/News/articles/2022/Nov/Renewable-Energy-for-Agri-food-Systems> (accessed on 3 March 2025).

Kabeyi, M.J.B. “Investigating the challenges of bagasse cogeneration in the Kenyan sugar industry,” International Journal of

Engineering Sciences & Research Technology, vol. 9, no. 5, pp. 7–64, 2020.

Kabeyi, M.J.B., Olanrewaju, O.A. (2022) Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition. *Journal of Energy* <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>.

Kumar S, Paritosh K, Pareek N, Chawade A, Vivekanand V. Deconstruction of major Indian cereal crop residues through chemical pretreatment for improved biogas production: an overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;90:160–70. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.049>.

Mengistu, M.G., Simane, B., Eshete, G., Workneh, T.S. “A review on biogas technology and its contributions to sustain able rural livelihood in Ethiopia,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 306–316, 2015.

Muhammad Abdul Qyyuma, Junaid Haidera, Kinza Qadeera, Valentina Valentinab, Amin Khanc, Muhammad Yasind, Muhammad Aslamd, Giorgia De Guidob, Laura A. Pellegrinib,**, Moonyong Lee. Biogas to liquefied biomethane: Assessment of 3P’s—Production, processing, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119 (2020) 109561

REN21. Renewables 2022 Global Status Report. 2022. Record Growth in Renewables, but World Missed Historic Chance for a Clean Energy Recovery. Available online: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (accessed on 3 March 2025).

Ryckebosch E, Drouillon M, Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass Bioenergy* 2011;35:1633–45. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.02.033>.

UNEP. Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an Age of Waste—Turning Rubbish into a Resource; UNEP: Nairobi, Kenya, 2024; ISBN 978-92-807-4129-2.

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>.

Watson HAJ, Vikse M, Gundersen T, Barton PI. Optimization of single mixed- refrigerant natural gas liquefaction processes described by nondifferentiable models. *Energy* 2018;150:860–76. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.013>.

Yang L, Ge X, Wan C, Yu F, Li Y. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;40:1133–52. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.08.008>.

Zain MM, Mohamed AR. An overview on conversion technologies to produce value added products from CH₄ and CO₂ as major biogas constituents. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;98:56–63. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.09.003>.

BÖLÜM 7

TOPRAK İŞLEME YÖNTEMLERİNİN CO₂ EMİSYON FAKTÖRÜ¹

Dr. Tuncay TOPDEMİR

Prof. Dr. İbrahim YALÇIN*

GİRİŞ

Tüm dünya ülkelerinin en temel sorunlarından bir tanesi olan küresel ısınmaya karşı, CO₂ emisyonlarını azaltacak tedbirlerin alınması ve bu konuda katkı sağlayacak tüm çalışmalara hız verilmesi gerekmektedir. Bu çalışma ile Türkiye'nin iklim değişikliğine uyum kapasitesinin geliştirilmesine ilişkin sonuçlar elde edilmesi ve kısa vadede bölgesel, uzun vadede ülkesel ve global düzeyde tarımdan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Sera gazları dünyanın canlı yaşamı için atmosferimizde gerekli olan gazlardır. Ancak sera gazlarının konsantrasyonlarında normalin çok üstünde artış küresel ısınmaya ve bunun sonucunda iklimin değişmesine neden olmaktadır. Bu artış özellikle karbon ve azot döngüsündeki dolanım hızlarına insan müdahalesinden kaynaklanmaktadır, doğal değildir ve çok hızlıdır. İklim değişimi gelecekte dünyanın doğada ve tarımda bulunan tüm canlılarla birlikte

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

insan için yaşanacak bir yer olmasını güçleştirecek değişimleri de beraberinde getirmektedir.

Ülkemizde özellikle sulu tarımın yapıldığı bölgelerde yoğun bir toprak işleme uygulaması mevcuttur. Yapılan bu yoğun toprak işleme sonucu üretim maliyetleri gereksiz yere önemli derecede artmaktadır. Doğal sera gazları olarak bilinen Karbon dioksit (CO_2), Metan (CH_4), Nitrik oksit (N_2O), Hidroflorokarbon (HFC), Perflorokarbonlar (PFCs), Kükürt heksaflorit (SF_6), Su buharı (H_2O) ile endüstriyel üretim sonucunda ortaya çıkan florlu bileşikler, atmosferdeki sera etkisini düzenleyen temel maddelerdir. Atmosferdeki CO_2 ve diğer sera gazlarının ulaştığı birikim düzeyi, sanayi devriminden bu yana hızla yükselmiştir. Atmosferdeki sera gazı birikimlerinin artmasına en başta fosil yakıt kullanımı, ormansızlaşma ve diğer insan etkinlikleri yol açmış; ekonomik büyümeyle nüfus artışı bu süreci daha da hızlandırmıştır. Yoğun toprak işleme de, sera gazı birikimlerinin artmasına neden olan uygulamalardan bir tanesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sulu tarım alanlarında toprak kalitesinin azalan organik madde ile düştüğü bilinmektedir. Toprak karbonunu artırması maksadıyla bitki artıklarının yakılmaması ve tarladan uzaklaştırılmaması önemlidir. Son yıllarda sürdürülebilir tarım tekniğini önemseyen ülkelerde koruyucu toprak işleme ve doğrudan ekim yöntemleri artan bir eğilim içinde olup, dünya genelinde bu konuda önemli adımlar atılmıştır. Çalışmanın amaçlarından bir tanesi de toprak sağlığının ve verimliliğinin korunması için toprak organik maddesinin zenginleştirilmesinin

gerekliliđi, aynı zamanda üretimde çevre bilincinin yerleřtirilmesi gerekliliđi dūřüncesi oluřturmaktadır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında getirilen kısıtlamaların, Avrupa'nın 2050 yılına kadar iklim-nötr hale gelmesini sağlaması beklenmektedir. Bu bağlamda, bu makale Avrupa bölgesine, özellikle de Polonya'ya ilişkin mevcut uluslararası bilimsel yayınlara dayanarak emisyon seviyelerinin azaltılmasına yönelik güncel çabaları incelemektedir. Çalışmada, sera gazı üretimine önemli ölçüde katkıda bulunan tarım sektörü özel olarak ele alınmıştır. Ayrıca çeşitli toprak işleme tekniklerinin ve organik ile inorganik gübrelerin—örneğin azotlu gübreler, digestat ve kompost—sera gazı emisyonları ile çevre açısından zararlı diğer maddeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Sokal, 2025).

Günümüze kadar yapılan çalışmalar, toprağın kalitesini, verimlilik düzeyini ve bitki beslenmesi açısından alınması gereken önlemleri ortaya koymasından başka toprağın fiziksel, kimyasal, biyokimyasal, mikrobiyolojik, mineralojik, zoolojik ve bitki fizyolojisi ile ilgili konuların birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Schinner, 1986). Toprakların biyolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroorganizmaların topraktaki sayı ve dağılımı ile birlikte bunların aktivitelerinin ölçülmesi prensibinden hareket edilmektedir (Gök ve Onaç, 1995). Toprakların toplam biyokimyasal aktivitesi enzimler tarafından katalizlenen bir seri reaksiyonları kapsamaktadır. Bu enzimlerin az bir kısmı mikrobiyal içerisinde görev alan endo - enzimler ile çok büyük bir kısmı canlı toprak mikroorganizmalarının besin maddelerini parçalamak amacıyla dışarıya saldıkları ekto -

enzimlerdir. Ekto - enzimler çevresel etkilere karşı diğer enzimlerden daha dayanıklı olup killer ve humin maddeleri gibi toprağın anorganik ve organik kolloidleri tarafından adsorbe edilirler.

Tarım kaynaklı sera gazı emisyonlarını kapsamlı şekilde ele alan bilimsel çalışmaların sayısı az olmakla birlikte, çiftçilerin çevre üzerindeki günlük etkilerine ilişkin farkındalıklarının giderek arttığı gözlemlenmektedir. Bu çalışma, tarımsal faaliyetlerin karbon dioksit, diazot monoksit ve metan olmak üzere üç temel sera gazının emisyonuna önemli ölçüde katkı sağladığını ortaya koymuştur. Kullanılan toprak işleme ve gübreleme yöntemleri, bu gazların atmosfere salınımında belirleyici bir role sahiptir (Sokal 2025).

Toprak organik maddesi ekosistemde cereyan eden yaşam çemberi içinde büyük bir öneme sahiptir. Ekosistemdeki yaşamın temelini toprak, su, hava ve güneş enerjisi oluşturmakta ve yaşam çemberi organik madde-mineral madde-organik madde döngüsü şeklinde devam etmektedir. Organik maddenin mineral maddeye dönüşmesi mikroorganizmalar tarafından; mineral maddenin de organik maddeye dönüşmesi mikro ve makro organizmalar tarafından gerçekleşmektedir. Toprakta bulunan mikroorganizmalar kendi yaşamları için topraktaki organik maddeyi parçalamakta ve enerji ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Organik maddenin parçalanması sırasında organik madde bünyesinde bulunan organik bileşikler halinde olan elementler mineralize olmakta, CO_2 , NH_3 , HCO_3 ve diğer ürünler açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu ürünler çeşitli kimyasal reaksiyonlardan geçerek bitkilerin yetişmesi için gerekli olan besin elementlerinin alınabilir forma dönüşmesini sağlamaktadır. Bitkiler de topraktan

aldıkları bitki besin elementlerini güneş enerjisi ile kullanarak yeni organik maddeler sentezlemektedirler. Bitkiler sentezledikleri organik madde ile hem gelişmekte, hem de diğer canlılara besin maddesi kaynağı olan organik bileşikleri oluşturmaktadır. Ekosistemdeki canlı yaşam çemberinin devamı mikroorganizma faaliyeti ve bitkilerin fotosentez aktivitesinin dengeli bir şekilde sürdürülmesine bağlıdır. Bu nedenle canlı yaşamın devamlılığı için kilit görev üstlenmiş olan mikroorganizmaların besin ve enerji kaynağı olan toprak organik maddesinin mikroorganizma yoğunluğunun ihtiyaçlarını karşılayacak düzeyde tutulması gerekmektedir.

Topraklarda tür ve sayıları ortama göre değişen bakteri, fungus ve aktinomisetler bulunmaktadır. Bu mikroorganizmaların sayıları 1 g toprakta, 1 ml su veya toprak çözeltisinde 10^2 'den 10^{10} ' lu rakamlara kadar değişmektedir. İşte bu kadar değişken tür ve sayıda bulunan ve yaşamın temel fonksiyonlarını gerçekleştiren mikroorganizma sağlığı ve yaşamını; bitkilerin yaşamı ile eşdeğerde tutmamız gerekmektedir. Durum böyle olunca, mikroorganizmalar için olmazsa olmaz koşul olan toprak organik madde miktarının bitki ve mikroorganizma ihtiyaçları düzeyinde tutulması gerekir.

Topraktaki organik madde miktarı iklim, yetiştirilen ürün, uygulanan toprak işlemleri, sulama, gübreleme ve topraktaki mikroorganizma varlığı gibi birçok faktörlere bağlıdır. Toprak işlemleri ile toprağın mevcut organik madde varlığı hızla azalır. Tarım topraklarında yetiştirilen bitkilerin tamamı toprağa iade edilmediğinden organik madde miktarı uzun yıllar içinde yıldan yıla azalmaktadır. Genel olarak toprakların içeriğinde %3 oranında organik madde

bulunmaktadır. Bu oran ülkemiz tarım alanlarında daha da düşüktür. Yapılan bir çalışmada Ege Bölgesi'nde tarım topraklarının %35'inde organik madde miktarının %1'den az (çok az) olduğu saptanmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar, sürdürülebilir ve ekonomik bir tarımsal üretim yapılabilmesi için toprak organik maddesinin %2'nin üzerinde olmasının gerekliliğini ortaya koymuştur

Türkiye toprakları genelde organik maddece fakirdir. Topraklarımızın organik madde miktarlarını işlenen topraklarda uygulanan münavebe sistemi toprağın işlenme süresi, toprak işleme teknikleri, toprak üstü bitki örtüsünün durumu veya tahrip derecesi, bitki atıklarının yakılması veya gömülmesi, kullanılan tarım tekniği, gübreleme biçimi gibi kontrol edilebilir faktörler yanında iklim, özelliklede sıcaklık ve yağış rejimi gibi faktörler etkilemektedir (Eyüpoğlu, 1999).

Öte yandan küresel ısınmaya sebep olan CO₂ emisyon miktarlarını, Kyoto Protokolünde belirtilen emisyon sınır değerlerine çekmek amacıyla uygulanması gereken tarımsal yönetim sistemlerinin belirlenmesi böylelikle tüm canlılar için en önemli sorunlardan birisi olan küresel ısınmanın temelini oluşturan sera etkisini azaltmak amacıyla tarımsal alanda alınması gereken önlemlerin neler olabileceği bu proje sonunda belirlenmeye çalışılmıştır. Önümüzdeki 100 yıl içerisinde olması öngörülen iklim değişikliği, yağışların azalması ve kuraklık etkilerinin azaltılmasına katkı sağlanması beklenmektedir.

İklim değişikliği sonucu, önümüzdeki dönemlerde dünyanın bazı bölgelerinde aşırı kuraklıklar baş gösterirken, diğer bölgelerde ise sel felaketlerinin meydana geleceği tahmin edilmektedir. Örneğin;

Akdeniz ülkesi olan İspanya, Yunanistan ve Türkiye’de ortalama yağışların her on yıl içinde %5’e varan oranda bir azalma kaydedeceği tahmin edilmektedir. (Parry, 2000)

İklim değişikliği sonucu ortaya çıkan kasırgalar, seller ve aşırı kuraklıklar, bio-çeşitliliğin ve bazı hayvan türlerinin yok olması tehlikesini de ortaya çıkarmaktadır. Ekonomik bağlamda yukarıda belirttiğimiz gelişmeler, global düzeyde tarım, sanayi, turizm, sigortacılık sektörleri başta olmak üzere birçok alanda çok ciddi tehlikeler arz etmektedir. (Karakaya ve Özçağ, 2003)

Uzun dönem sürdürülebilir bitki üretimi için gerekli olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik toprak özelliklerini iyileştiren toprak işleme sistemlerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını gerektirir. Toprak şartlarının değişmesi toprak organik maddesinin derinlerde dağılımı, mikrobiyal aktivite ve besin dinamikleri üzerindeki etkileri yoluyla verimliliği ve sürdürülebilirliği önemli derecede etkileyebilir (Salinas-Garcia ve ark., 2002). Son on yıldaki çok sayıda çalışmada, toprak yüzeyindeki bitki artık birikimine karşılık organik karbon ve mikrobiyal aktivite, toprak işlenmesiz toprak yüzeyinde geleneksel işlenmiş toprak yüzeyine göre daha büyük bulmuştur (Franzluebbers ve ark., 1995).

Kyoto Protokolünün, 3.4 nolu maddesi tarım topraklarının yönetiminin geliştirilmesini kapsamaktadır. Bu konuda araştırmalar ülkelerin taahhütlerini yerine getirmek için farklı yönetim stratejilerinin karbon iyileştirme yönünden karşılaştırılmasında yoğunlaşmaktadır. Örneğin IPCC’nin oluşturduğu farklı senaryolara göre modellemelere gidilerek toprak karbonunun kaybını azaltmak konusunda yapılan

çalışmalarda, biyokütle yoğun tarla bitkilerinde karbon kayıplarının fazla olacağı, ürün münavebesi, örtü bitkisi, işlemez tarım ve yeşil gübre bitkilerinin devreye sokulmasının topraktan organik karbonun kayıplarını aza indireceğı sonuçlarına varılmıştır. (Paustian ve ark., 1997)

CO₂ bitkinin gıdasıdır ve her canlı zahmetsiz hazır gıdaya ulaşıyorsa diğerk şartlar engel oluşturmuyorsa (örneğin toprakta yeterli suya ulaşamama) fazlasını alır. Ancak bu fazlalık sonuçta muhakkak sıkıntı doğurur. C/N oranının artması bitki yapısını bozar. Yalnızca bu nedenden ötürü yaprak ve sürgünde tanen miktarının artması ekosistemin besin zincirini ve sistemin tür çeşitliliğini ve popülasyonunu bozacaktır. Yine havadaki CO₂ yüksekliğinin bitki fenolojisini değıştirmesi dolayısıyla canlılar arası ilişki bozulur. Doğal ekosistemlerde bu durumlar adaptasyon kabiliyeti yüksek istilacı otsuların işine yarar ve doğal bitki türlerinin kaybını doğurur. Yaşanılan gerçek her çözümün yeni bozulmalara sahne olması senaryosunun tekrarı olabilir. Tüm çevresel problemlerde olduğu gibi küresel ısınmayla mücadele konusunda aynı senaryolar tekrarlanmaktadır. Atmosfere sis vermek ve dev uzay aynaları yerleştirmek gibi çılgın öneriler dahil olmak üzere çözüm bilim ve teknoloji den beklenmektedir. (Adam, 2007)

Aynı coğrafyada tarım sisteminin, yapı ve işleyiş olarak çevresindeki doğal ekosistemle olan benzerliğı ölçüsünde sürdürülebilirliğı söz konusudur. Sürdürülebilir tarım yüzyıllar boyunca gelişen geleneksel tarım bilgi sistemlerinin tecrübesini bugünün doğal kaynak tabanını dikkate alarak ve tarım teknolojisine

bağlayarak sistemini kurmalıdır. Tarım küresel ısınmanın getirdiği sorunlarla varlığını sürdürmek zorundadır. Ekosistem yaklaşıcısı gelecekte iklim değişiminin kendi coğrafyasına olacak etkilerini şimdiden hesaba katabilme öngörüsündedir. Örnek verirsek, Akdeniz Bölgesi çiftçisi, en az toprak işleme, en az sulama, yerel çeşitleri gelecekteki sıkıntılar için koruma ve bugün için kullanma gibi tedbirler almak zorundadır.

Son yıllarda küresel ısınma ve çevre kirliliği büyük önem arz etmektedir. Yoğun toprak işlemeden sonra topraktaki karbon hızla atmosfere karışmaktadır. Bu durum atmosferde kabul edilemez miktarda karbondioksit emisyonuna neden olmaktadır. Toprak verimliliğinin geliştirilmesi için karbonun toprakta biriktirilmesi yerine toprak işleme ile karbonun serbest kalması sera etkisi ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Sürdürülebilir tarımın başarılması ve küresel ısınmanın önlenmesi amacıyla, toprak işleme minimum düzeye kadar azaltılmalı veya tamamen kaldırılmalıdır. Toprak mümkün olduğu sürece malç (çayır veya yetiştirilen ürünler) ile kaplanmalıdır. Eğer sürdürülebilir tarım gerçekleştirilirse uygun münavebe kombinasyonunda bir önceki ürünün veya yeşil gübrelemenin üzerine doğrudan ekim geleceğin üretim sistemi olacaktır. Dünyada 105 milyon hektar alanda doğrudan ekim (anıza ekim) yapılmaktadır. Doğrudan ekim ilk olarak 1971 yılında Latin Amerika’da denenmiştir. Latin Amerika’da 1987 yılında 670.000 ha alanda anıza ekim yapılyorken 2004 yılında bu alan 60 kat artarak 40.600.000 ha olmuştur.

Toprak işlememe (no-tillage) veya azaltılmış toprak işleme tekniklerinin kullanılması, sera gazı emisyonlarını azaltırken tarımın

sürdürülebilir gelişimine katkıda bulunmaktadır. Kullanılan makineler ve yakıt türleri ile hassas gübreleme için geliştirilen yenilikçi sistem ve sensörler de tarımsal emisyon seviyelerinin düşürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yazarlar, ürün verimliliğini artırmaya yönelik potansiyel fırsatları belirlemeyi ve gaz emisyonlarında sürdürülebilir azaltımlara katkı sunmayı amaçlamaktadır (Sokal, 2025).

Bu çalışma ile tarımsal üretim sırasında gerçekleştirilen aşırı veya yanlış toprak işleme uygulamalarının ekosisteme olan olumsuz etkileri ortaya konulmaya çalışılmış, azaltılmış toprak işleme yöntemlerinin yaygınlaştırılmasıyla hem topraktan CO₂ emisyonunun düşürülmesi, hem de toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Projede Sadece CO₂ gazı emisyonunun seçilmesinin nedenleri, bu gazın toplam sera gazları içinde %88 gibi önemli bir paya sahip olması ve fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarına yönelik verilerin, diğer gazlara göre daha doğru bir şekilde hesaplanabilmeleridir.

Çalışma ile yoğun toprak işleme sonucu oluşan CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik toprak işleme sistemleri karşılaştırılmıştır. Toprak işlemenin hemen ardından, gün içerisindeki CO₂ emisyonu değişimleri incelenmiştir. Bu değişimin toprak işlemeden hemen sonra yüksek olup olmadığı, diğer bir ifade ile toprak işlemenin ardından CO₂ emisyonu düzeyinin giderek azalma eğiliminde olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca günün farklı zamanlarında CO₂ emisyonu değişimi de incelenmiştir. Bu iki bulgu dikkate alınarak CO₂ emisyonu açısından gün içerisindeki uygun toprak işleme zamanı tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca toprak işleme

uygulamalarının toprakta meydana getirdiği fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişiklikler karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda toprak işleme yöntemlerinin emisyon faktörleri belirlenmeye çalışılmıştır. Böylelikle Ülkesel ölçekte toprak işleme kaynaklı CO₂ emisyonlarının hesaplanması için temel bir katsayı olarak kullanılmasına olanak sağlanacaktır.

Özellikle yoğun toprak işleme yapılan yerlerde, toprak kaynaklı emisyonlar önemli ölçüde artar. Buna karşın azaltılmış toprak işleme ve doğrudan ekim yöntemi ile atmosferden alınan karbon bitkiler ve toprak tarafından depolanarak uzun dönemli yutak olarak döngüdeki yerini alır.

İklim değişikliği – Tarım etkileşimi alanında AR-GE çalışmaları önemli yer tutmaktadır. Bu bağlamda, yürütölen bu çalışma ile toprak işlemeden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ile bölgesel ölçekte kısa dönemli, ülkesel ve global düzeyde orta ve uzun dönem etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Yine bu çalışmada toprak işleme uygulamalarının toprakta meydana gelen kimyasal ve biyolojik değişikliklerle, özellikle organik karbon ve mikroorganizmalar faaliyetler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Ayrıca araştırma sonuçlarının bu yayın ile tüm sektör paydaşları ile paylaşılması, Ülkemiz çiftçilerine duyurulması, böylece koruyucu toprak işleme yöntemlerinin diğer avantajlarından biri olan düşük yakıt maliyeti ile daha kazançlı bir üretim sağlanarak ulusal ekonomiye katkı sağlanmasının yanı sıra çiftçiler arasında çevre ve doğal kaynakların korunmasına yönelik farkındalığın artırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1. İklim Değişikliği ve Tarım Etkileşimi

Günümüzde yaşantımızın her anında ve her alanda iklim değişikliğinin etkilerini görmekteyiz. Bu etki zaman zaman ekonomik, sosyal ya da çevresel olabildiği gibi, zaman zaman da oluşan ekstrem hava olayları yoluyla direk olarak yaşamımızı tehdit etmektedir. İklim değişikliği karşımıza sadece küresel ısınma olarak değil, mevsimsel dalgalanmalar, kuraklık, sel gibi olumsuz koşullar ile de doğrudan tarımsal verimliliğimizi etkilemektedir. İklim bilimciler bu olayları çoğunlukla sera gazı emisyonlarındaki artışlara bağlamaktadır. Bu gazların başında da karbondioksit, metan, nitrozoksit gibi gazlar gelmektedir.

İklim değişikliği raporları, insan faaliyetlerinin sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmayı hızlandırdığını göstermektedir. Dünya yüzey sıcaklıkları, 1850–1900 ile 2010–2019 dönemlerine kıyasla yaklaşık 1,5 °C artış göstermiştir (Lee, 2023). Bu durum, farklı ekonomik seviyeler, sürdürülemez enerji kullanımı, arazi ve orman kullanımındaki değişiklikler, yaşam tarzı ve tüketim alışkanlıklarındaki farklılıklar ile ülkeler ve bölgeler arasındaki üretim dengesizliklerinden kaynaklanmaktadır (Lee, 2023).

İklim değişikliği karşılaştırılabilir zaman dilimlerinde gözlenen doğal iklim değişikliğine ek olarak, doğrudan veya dolaylı biçimde küresel atmosferin bileşimini bozan, insan faaliyetleri sonucunda iklimde oluşan değişikliklerdir. Bilindiği üzere iklim değişikliği, etkileri ve sonuçları itibarıyla dünyayı yakından ilgilendiren önemli bir sorun niteliğindedir. İklim değişikliğinin etkileri ve sonuçları hissedilir şekilde yaşantımızı etkilemekte, salgın hastalıklar, kuraklık, erozyon,

çölleşme, iklim kuşaklarının yer değiştirmesi, şiddetli hava olaylarının artması, deniz seviyesinin yükselmesi, doğal dengenin bozulması sonucu yaşam türlerinin zarar görmesi ve insan sağlığının bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum sosyo-ekonomik sektörleri ve ekolojik sistemleri doğrudan yada dolaylı olarak etkileyerek istenmeyen sonuçlara yol açmaktadır (Anonymous, 2020).

İklim değişikliğinin, tarımsal faaliyetler üzerindeki etkileri üretim ve beslenme ilişkisi nedeniyle ayrı bir öneme sahiptir. Bu nedenle Bakanlığımız, tarım sektörünün iklim değişikliğinden daha az etkilenmesi açısından iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı gerekli önlemleri almakta, diğer yandan çiftçilerimizde farkındalığı artırmak amacıyla iklim değişikliğinin etkilerinin azaltımı ve uyumu konularında çalışmalar yapmaktadır. Uluslararası alandaysa iklim değişikliğine karşı ortak çalışmalar dikkati çekmektedir. Birleşmiş Milletler'in çatısı altında 1994'de yürürlüğe giren İklim Değişikliğiyle Mücadele Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), 2004 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ve 2016'da yürürlüğe giren Paris Anlaşması bu mücadelenin en önemli odak noktalarıdır (Anonymous, 2020).

İklim değişikliği, tüm ekosistemi ve tüm bölgeleri sürekli olarak olumsuz etkilemektedir. Son birkaç on yılda bilim insanları, flora, fauna ve insan toplulukları üzerindeki çeşitli iklimsel sapmaların çok yönlü araştırmalarını yapmaktadır. Dahası, iklimsel değişimler, bozulmamış eko-çeşitliliğin yanı sıra tüm mikrobiyal biyotanın canlılığını da yoğun şekilde etkilemektedir. Eş zamanlı olarak, farklı çevresel değişimler, tüm biyolojik alemin üretkenlik oranlarını düşürmektedir. Küresel ısınma, ozon seviyesi dengesizliği, atmosferik CO₂ emisyonu ve

sıcaklık dalgalanmaları, bulaşıcı insan ve yaban hayatı çeşitliliği üzerinde doğrudan veya dolaylı olarak baskın bir etkiye sahiptir. Bu olumsuz senaryo sırasında, adaptasyonları sürekli olarak azalmış ve bu değişimler yavaş yavaş biyotik ve abiyotik stres faktörleriyle etkileşime girmiştir. Bu önemli noktalar altında, yerli mikrobiyal rejimlerin yoğun çabaları, nesli tükenmekte olan türlerin daha az etkilenmesi, düzenli olarak ekonomik hizmetler sağlayan iyonik türlerin (örneğin tozlaşma, başka türlere ait popülasyonların sağlanması), gıda güvenliğini yaygın olarak sağlamak için toprak gübrelemesi, ölümcül ve yüksek bitki hastalıklarını azaltma, mikrobiyal türlerin (örneğin algler, bakteriler, mantarlar) büyümesini teşvik etme gibi farklı beklentiler için yeniden canlandırılacaktır. Dolayısıyla, bu mevcut beklentiler, yaygın çalışmanın çeşitli iklim sorunları ve bunların flora, fauna ve insan topluluklarının çeşitliliği üzerindeki genetik ve fizyolojik düzeylerdeki etkileri hakkında kapsamlı bir tasvirle ilgilenmektedir. Bununla birlikte, bu dinamik faktörlerin üstesinden gelmek, sentetik biyoloji ve metabolik mühendislik alanlarında büyük bir biyolojik devrim yaratmıştır. Çeşitli flora, fauna ve insan rejimlerini kontrol etmek için çeşitli genetiği değiştirilmiş yerel mikrobiyal sistemler bir araya getirerek, sert iklim koşullarına karşı gıda güvenliği kayıplarını azaltmaya yardımcı olabilir. Dahası, mevcut kapsamlı literatür araştırması, flora, fauna ve insanlar üzerinde iklimsel değişikliklerin potansiyeline dikkat çekmeye yardımcı olmaktadır (Ghosh ve ark.).

Atmosferdeki CO₂ seviyesi sanayi öncesine kıyasla yaklaşık 100 ppm artmış olup (Linguist, 2012, Shibata, 2016), toplam sera gazı emisyonlarının 2000–2030 yılları arasında %50 artması beklenmektedir

(Verge, 2007). AB mevzuatı (97/68/EC, 2010/22/EU, 2010/26/EU) (Anonymous, 2010a, Anonymous, 2010b), 2050 yılına kadar çeşitli sektörlerde sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azaltılmasını öngörmektedir. Ulaştırma sektöründe 1990 seviyelerine göre %90 azalma, binalar ve atık sektörlerinde 2005 seviyelerine göre en az %55 azalma hedeflenmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında Avrupa'nın iklim nötr bir kıta hâline gelmesi planlanmaktadır (Anonymous, 2019).

AB, binek araçlar, kamyonlar, arazi dışı araçlar ve tarım traktörleri için egzoz emisyon standartları getirmiştir (Lovarelli, 2019). Tarım traktörleri fosil yakıt kullanımı yoluyla önemli miktarda sera gazı üretmektedir (Renius, 2020). Yakılan her litre dizel, yaklaşık 2,7 kg CO₂ ve SO₂, NO_x, HC, CO ile PM gibi diğer kirleticileri salmaktadır (Janulevicius, 2017, Perozzi, 2016). CH₄ ve N₂O, atmosferin ısınmasına katkıda bulunan önemli sera gazlarıdır ve başlıca kaynakları hayvancılık ile yakıt üretimidir. Bu gazlar atmosferde ısıyı tutarak küresel sıcaklıkların yükselmesine ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşmasına neden olmaktadır (Gu, 2016, Zhang, 2017).

İçten yanmalı motorlardaki fiziksel ve kimyasal süreçler karmaşık olup simülasyonu zordur. CO₂ oranı, yanmanın doğruluğunu ve verimliliğini ölçmede önemli bir göstergedir. Son dönemde yapılan araştırmalar, dizel ve benzinli egzoz gazları, tarım traktörlerinin motor emisyonları, tarladaki enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları, yakıt kalitesi ve araç tipi etkileri gibi konulara odaklanmıştır (Hansson, 2001, Nelson, 2008). Bazı çalışmalar, traktörlerin farklı tarımsal görevlerdeki

performansını incelemiş ancak kirletici emisyonlara ilişkin referans değerler sunmamaktadır (Li, 2006, Janulevicius, 2013).

Tarımsal açıdan değerlendirdiğimizde, tarımsal ürünlerin fizyolojilerini doğrudan etkilediği gözlemlenmektedir. Şöyle ki kışların sıcak seyretmesi ya da ilkbahar geç donlarının fazlaca görülmesi, çiçeklenme sorunları yaşatabildiği gibi, soğuk ve don etkisiyle zararlanmasına yol açabilmektedir. Yine aynı şekilde hava sıcaklığının düşük ya da yüksek seyretmesi, yağışların dağılımındaki düzensizlikler, ekstrem hava olayları, farklı hastalık ve zararlıların ortaya çıkmasına sebep olabileceğinden doğrudan verimi etkilemektedir. Bu durum tarımsal ürünlerin arz güvenliğini doğrudan tehdit etmektedir.

İklim değişikliği gıda güvenliğini, gıdaların tedariki, gıdalara erişilebilirlik, gıdaların etkin kullanımı ve gıda sistemlerinin stabilizasyonu olmak üzere dört şekilde etkilemektedir. Bu etkiler kısa dönemde, ekstrem iklim olayları nedeniyle ortaya çıkabilirken, uzun dönemde sıcaklıklardaki ve yağış rejimlerindeki değişmelerle gıda güvenliğini risk altına sokmaktadır (FAO, 2009).

İklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkisinin sebeplerini ise uzun süren kuraklıklar, ekstrem yağışlar ve seller, verim artışı ve zararlılarla mücadele için kullanılan herbisit ve pestisit gibi kimyasal ilaçlar, çiftlik hayvanlarının telef olması, balıkçılık yapılan kıyıların elden çıkması, tarım zararlılarının ve hastalıkların çoğalması olarak sıralayabiliriz (FAO, 2009).

Bütün bu anlatılanlar doğrultusunda özellikle tarımsal uygulamalardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliği etkilerinin azaltılması noktasında büyük önem

taşımaktadır. Tarımsal sera gazı emisyonlarının kaynaklarının ilk sırasında da yoğun tarımsal uygulamalar gelmektedir. Aşırı azotlu gübre kullanımı nitrozoksit ve yoğun toprak işleme uygulamaları da karbondioksit gazı emisyonlarını doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışma özellikle geleneksel toprak işleme kaynaklı CO₂ emisyonlarının azaltılması amaçlı olarak koruyucu toprak işleme yöntemlerinin önemini ortaya koymayı amaçlamıştır.

2. Koruyucu Toprak İşlemenin Önemi

İnsanlar kas gücüyle arazinin belli miktarını belli derinlikte işleyerek doğrudan ekim ve azaltılmış toprak işlemeli ekim yöntemini eski zamanlardan bu yana kullanmışlardır. Örneğin eski Mısırlılar ve Güney Amerika'nın Andes bölgesinde yaşayan İnkalar kazık kullanarak toprakta çukur açmışlar ve işlenmemiş toprağın içine elleri ile tohum bırakmışlardır. Modern dünyada, makineli tarım, ürünlerin toprak işlemeyen yetiştirilmesi uzun zaman önce denendi, fakat bu teknik modern herbisitlerin gelişine kadar pratiğe aktarılamamıştır. 1940 lı yıllara gidildiğinde Edward Faulkner “Pulluk adamın delilikleri” (Plowman's Folly) adlı kitabında pullukla toprak işlemeyi elimine ederek azaltılmış toprak işlemeli ekim değişimini eyleme geçirmiştir (Faulkner, 1943).

Koruyucu toprak işlemeli ekimde toprağa en az müdahale ederek, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik yapısını bozmadan üretim yapma amaçlanmaktadır. Koruyucu toprak işlemeli ekim, toprağı yıl boyunca erozyondan korumak için yeteri kadar bitki kalıntısının yüzeyde bırakıldığı ekim sistemidir. Pulluk kullanılarak

aşırı toprak işlemenin yapıldığı geleneksel ekime alternatif olan ve toprağa daha az müdahale edilerek yapılan doğrudan ekim, sıfır toprak işlemeli ekim, azaltılmış toprak işlemeli ekim, malç ekim, sırta ekim ve daimi sırta ekim yöntemleri koruyucu toprak işlemeli ekim yöntemi olarak kabul edilmektedir.

Koruyucu toprak işleme ve özellikle doğrudan ekime göre geleneksel toprak işlemede, makine yatırımı, bakım onarım ve iş gücü bakımından daha yüksek girdilere ihtiyaç duyulmaktadır. Toprak sıkışması sonucu, toprak işleme aletlerinin çeki kuvveti ve enerji tüketimleri artmaktadır. Bunun yanında, aletlerin parçalama etkinliği azalarak, toprakta büyük kesekler oluşmaktadır. Bilimsel çalışmalar, makine tekerleklerinin etkisiyle toprakta meydana gelen sıkışmanın pulluk çeki gücü gereksiniminde % 90 oranında artış meydana getirdiğini göstermiştir (Williford, 1980; Gökçebay, 1988; Bateman,1959).

Koruyucu toprak işlemeli ekim, toprak sıkışması, toprak işleme ihtiyacı, kimyasal kullanımı, işçilik ve makinelerin yıpranmasının azaltılması, zaman ve yakıt tasarrufu sağlaması, uzun dönemde verimliliği, toprak su tutma kapasitesini, toprağın fiziksel yapısını, su infiltrasyonunu ve toprak işlemeyi iyileştirmesi vb. faydalar sağlaması nedeniyle tarımla uğraşan ailelere ve ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacaktır.

Tarım sektöründeki emisyonlar, tarım makinelerinin kullanımı ve saldığı gazlar ile toprağın yapısına ve kimyasal bileşimine yapılan müdahalelerle ilişkilidir. Küresel gıda sistemi tek başına, yıllık emisyonların yaklaşık %21–37’sinden sorumludur (Lynch, 2021).

Tarım verimliliği artmakla birlikte, iklim değışikliğı son 50 yılda bu artışı sınırlamıştır (Lee, 2023). Verimlilik artışı, ara girdilerin kullanımını azaltarak tarımsal emisyon yoğunluğunu düşürebilmektedir. Ancak, tarım ve gıda sistemlerinden kaynaklanan gazların bileşimi, küresel emisyon dengesini tam olarak yansıtmamaktadır. Tarımsal faaliyetlerin antropojenik metan emisyonlarının yarısını ve N₂O emisyonlarının dörtte üçünü ürettiğini belirtmektedir (Mbow, 2019). Diğer çalışmalar ise tarımın küresel antropojenik sera gazı emisyonlarının %10–12’sinden sorumlu olduğunu göstermektedir (Pascuzzi, 2024). Tarımdaki sera gazı emisyonlarının büyük oranda birkaç ürün üzerinden yoğunlaştığını, örneğin sığır eti, süt ürünleri ve pirincin toplam emisyonların %80’inden fazlasını oluşturduğunu bildirmiştir (Lynch, 2021).

Bu nedenle, koruyucu toprak işlemenin sayılan birçok faydasından biri olan toprak organik karbonunun iyileştirilmesi ve özellikle CO₂ emisyonunun azaltılması amacıyla bu yöntemlerin yaygınlaştırılması ve benimsetilmesi büyük önem arz etmektedir.

3. Sera Gazı Emisyonlarının ölçülmesi ve hesaplanması

Karalar ve okyanuslar, insan faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yaklaşık %56’sını yıllık olarak absorbe etmektedir. Bu durum, insan beslenmesi, su ve sağlık ekonomileri üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. İklim değışikliğı, dünya genelinde aşırı hava olaylarını artırmakta ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri’ne ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Tarım sektörü, çevresel etkisi büyük olan sektörlerden biridir. Tarım, sera gazı emisyonlarından sorumlu

tutulmakla birlikte, karbon yoğunluğu açısından ekonomik sektörler arasında dördüncü sıradadır. 2023 yılının ikinci çeyreğinde AB’de toplam sera gazı emisyonları 821 milyon ton CO₂ eşdeğerine ulaşmış olup, en yüksek emisyon oranları imalat sanayi (%23,5), hane halkları (%17,9), elektrik ve gaz arzı (%15,5), tarım (%14,3) ile ulaştırma ve depolama (%12,8) sektörlerinden kaynaklanmaktadır (Lee, 2023).

Sera Gazı denildiğı zaman, kızıl ötesi radyasyon emen ve yeniden salan, hem tabii ve hem de beşeri kaynaklı olabilen ve CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ gibi gazlar ve gaz benzeri diğerkatmosfer bileşenlerini anlamamız gerekmektedir. Sera gazı emisyonlarının çıktığı, bir tesisin ayrı olarak tanımlanabilir parçasını veya tesisin bir prosesine de Emisyon Kaynağı adı verilir (T.C. Resmi Gazete, 22.07.2014, sayı:29068). Toprak işleme yöntemlerinin emisyon faktörünü ise birim alandan kaynaklanan toplam emisyon miktarının birim alana bölünmesiyle elde edilen bir katsayı olarak belirtebiliriz. Bu hesaplama yaklaşımı, kabul edilmiş ve küresel ölçekli bir emisyon faktörü katsayısı kullanılarak topraktan atmosfere salınan CO₂ emisyonunun miktarının hesaplanmasında kullanılır.

Bütün ölçümler, 12/10/2011 tarihli ve 28082 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Sürekli Emisyon Ölçüm Sistemleri Tebliğı hükümleri uyarınca yürütülür. İşletme, ekipmanın yeri, kalibrasyonu, ölçümü, kalite güvencesi ve kalite kontrolünü de dâhil ederek sürekli ölçüm sisteminin bütün yönlerini dikkate alır.

Tarım alanlarından çıkan emisyonların ölçülmesi de benzer şekilde, doğru yöntem ve ekipman ile titizlikle yapılmalıdır. Ölçüm

yapılan cihazın kalibrasyonu yapılmış ve ölçüm sırasında cihazın gereksinimlerinin tam olarak yerine getirilmiş olması gerekir.

3.1 Emisyonların Ölçülmesi ve Hesaplanması

Sera gazlarının ölçülmesi bir ölçüm cihazı ile yapılabilir. Bu cihaz ile belirli bir kaynaktan salınan sera gazı birim alandan, birim zamandaki büyüklüğü olarak ifade edilmelidir. Bu şekilde yapılan emisyon belirleme işlemine ölçüm temelli yöntem adı verilir. Yapılan ölçümlerin hassasiyeti sonrasında yapılacak hesaplamalarda baz alınacaksa çok önemlidir. Bu nedenle yapılacak ölçümler tekerrürlü yapılmalıdır. Ölçümlerin tekrarlı şekilde yapılması ve bir tereddüt halinde cihazın kalibrasyon başta olmak üzere tüm ayarlamaları ve kontrolleri sağlandıktan sonra ölçüme en başından başlamak doğru bir yaklaşım olacaktır.

Ölçüm temelli yöntemi biz kaynağında ölçmek ya da laboratuvarında ölçmek olarak iki şekilde yapabiliriz.

Saatlik değerler, ilgili işlem saatinin tüm ölçüm sonuçlarının ortalaması olacak şekilde belirlendiğinde, gaz akışının saatlik değerleri ile çarpılan ölçülmüş sera gazı konsantrasyonunun bütün saatlik değerleri tüm raporlama dönemi için toplanır ve raporlama dönemindeki emisyon kaynağından çıkan yıllık emisyonlar belirlenir (T.C. Resmi Gazete, 22.07.2014, sayı:29068). Emisyon belirleme işlemlerinde iş akışı;

- Verilerin toplanması,
- Kayıp verilerin tamamlanması,
- Emisyon hesabının teyidi,

şeklinde olmalıdır (T.C. Resmi Gazete, 22.07.2014, sayı:29068).

3.2 Emisyon Faktörü ve Belirlenmesi

Toprak işleme yöntemlerinin emisyon faktörünü birim alandan kaynaklanan toplam emisyon miktarının birim alana bölünmesiyle elde edilen bir katsayı olarak belirtebiliriz. Bu hesaplama yaklaşımı, kabul edilmiş ve küresel ölçekli bir emisyon faktörü katsayısı kullanılarak topraktan atmosfere salınan CO₂ emisyonunun miktarının hesaplanmasında kullanılır. Bilinen uygulamalardan kaynaklı büyük çapta emisyon hacmi hesaplamalarını yapabilmemiz için emisyon faktörünün bilinmesine ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada lokal işletme bazlı hassas CO₂ emisyonu ölçümleri yapılmış, alansal yıllık emisyon miktarları hesaplanmış ve buna bağlı olarak da farklı toprak işleme yöntemlerinin emisyon faktörü hesaplanmıştır.

Emisyon hacminin hesaplanmasında 3 farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemler;

- Tier 1: Basit yöntem, aktivite verisi ve kabul edilmiş emisyon faktörü,
- Tier 2: Aktivite verisi, ülkeye özel emisyon faktörü,
- Tier 3: Daha detaylı, tesis bazlı ülkeye özel yöntemlerdir.

Kademe 1 (Tier 1) yöntemleri, kullanımı en kolay olacak şekilde tasarlanmıştır; Ülkeye özgü faaliyet verilerine ihtiyaç vardır, ancak Kademe 1 için çoğu zaman küresel olarak erişilebilir faaliyet verisi tahmin kaynakları bulunur (örneğin ormansızlaşma oranları, tarımsal üretim istatistikleri, küresel arazi örtüsü haritaları, gübre kullanımı,

hayvancılık popölasyonu vb.), ancak bu veriler genellikle mekânsal olarak kaba çözünürlüktedir.

Kademe 2 (Tier 2), Kademe 1 ile aynı yöntemsel yaklaşımı kullanabilir, ancak en önemli arazi kullanımı veya hayvancılık kategorileri için ölke veya bölgeye özgü verilere dayanan emisyon ve stok değışim faktörleri uygular. Ölke tarafından belirlenen emisyon faktörleri, o ölkenin iklim bölgeleri, arazi kullanımı sistemleri ve hayvancılık kategorileri için daha uygundur. Kademe 2’de, belirli bölgeler ve özel arazi kullanım veya hayvancılık kategorileri için ölkeye özgü katsayılarla uyumlu olacak şekilde daha yüksek zamansal ve mekânsal çözünürlükte ve daha ayrıntılı faaliyet verileri kullanılır.

Kademe 3’te (Tier 3), ulusal koşullara göre uyarlanmış modeller ve envanter ölçüm sistemleri gibi daha üst düzey yöntemler kullanılır; bunlar zaman içinde tekrar edilir ve yüksek çözünürlüklü faaliyet verileriyle beslenir ve alt ulusal düzeyde ayrıştırılır. Bu üst düzey yöntemler, daha düşük kademelere göre daha yüksek kesinlik sunan tahminler sağlar. Bu tür sistemler, düzenli aralıklarla tekrar edilen kapsamlı saha örneklemelerini ve/veya yaş, sınıf/üretim verileri, toprak verileri, arazi kullanımı ve yönetim faaliyetleri verilerini içeren ve çeşitli izleme türlerini entegre eden CBS (GIS) tabanlı sistemleri içerebilir. Arazi kullanım değışikliğinin meydana geldiği alanlar genellikle zaman içinde, en azından istatistiksel olarak izlenebilir. Çoğu durumda bu sistemler iklim bağımlıdır ve bu nedenle yıllar arasında değışkenlik gösteren kaynak tahminleri sağlar. Modeller kalite kontrollerinden, denetimlerden ve doğrulamalardan geçirilmiş olmalı ve ayrıntılı şekilde belgelenmelidir (IPCC, 2006).

Bu çalışma Tier 3 yaklaşımı ile CO₂ emisyonu için emisyon faktörünü lokal olarak belirlemiş geniş alanlarda ve ülkesel ölçekte sera gazı emisyonu hesaplamalarında kullanılmak üzere emisyon faktörü verisi üretmeyi amaçlamıştır.

4. Materyal ve Metod

4.1 Materyal

4.1.1 Deneme Yerinin Tanımı ve Genel Özellikleri

Bu çalışma Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Makine Sistemleri Anabilim Dalında Doktora çalışması olarak yürütülmüştür. Çalışma T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü'ne bağlı İzmir Menemen Uluslararası Tarımsal Araştırma ve Eğitim Merkezinin araştırma deneme alanında kurulmuştur. Menemen ovası Gediz Havzasının mansap yer almaktadır. Gediz Havzası Batı Anadolu'daki dört büyük vadi arasında havza ve taban genişliği bakımından ikinci sırada yer alır. Havzanın alüvyal tabanı Manisa ilinin batısında yer alan Emiralem boğazı ile ikiye ayrılmıştır. Menemen Ovası Emiralem boğazı ile deniz arasında kalan kısımdır. Doğusunda Yamanlar Dağı, Kuzeyinde de Foça dağlık yöresi ile kuşatılmıştır (Topraksu, 1971).

4.1.2 Toprak, Arazi ve İklim Özellikleri

Menemen Ovasındaki tarım topraklarının büyük bir bölümü orta ve orta-ağır bünyeye sahiptir. Menemen Ovası alüvyal araziler ile kolüvyal dağ eteklerini kapsamaktadır. Eski Gediz yatağı kenarında

genel olarak daha hafif bünyelidir. Batıya doğru gidildikçe ağır bünyeli karakteristik göstermektedir. Ova doğusundan ve kuzeyinden genellikle dik eğimli tepeler tarafından kuşatılmaktadır. Gediz havzası çevre dağlarının yüksekliği ise 1100 m'ye yaklaşmakta olup, alüvyal tabanı 0-6 m, yan alüvyaller ise 6-30 m yükseltiye sahiptir. Ovada 16 adet toprak serisi bulunmaktadır ve bunlar 5 toprak birliği içinde yer alır. Ulucak serisi ise büyük ölçüde yüksek araziler üzerinde oluşmuştur. Ulucak serisi dikkate alınmadığı takdirde ova topraklarının ilk üç sırada yer alan başlıca toprak serileri oransal olarak büyüktür. Küçüğe % 24.5 Süzbeyli, %17.8 Gediz ve %13 ile Eskiyaak serileri şeklindedir. Ovada Gediz ve Havaalanı toprakları orta ve yetersiz drenajlı olmasına rağmen, yandere aluviyum ve koluviyum üzerindeki toprakların iyi drenajlıdır. Alçak tabanda bulunan Süzbeyli, Gürle ve Tuzcullu bölgesi toprakları yine drenaj sorunu yaşayan bölgelerdir. Gediz Nehrinin doldurduğu delta ve ova genel olarak tarıma elverişli olup, deniz seviyesinde bulunan yerlerde tuzlu alanlar ve bataklıklar bulunmaktadır (Topraksu, 1971).

Menemen Ovası iklim kuşağı olarak Akdeniz iklimi kuşağında yer almaktadır. Mevsimler yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı geçmektedir. Çizelge 3.1'de verilen 1954 – 2022 yılları arası ortalama iklim verilerine göre; toplam yıllık yağış 546,30 mm olup bunun yaklaşık %50,5'i kış, %23'ü sonbahar, %24,3'ü ilkbahar ve %2,2'si yaz aylarında gerçekleşmiştir. Uzun yıllar sıcaklık ortalaması 17,99 0C olup, en sıcak ay olan temmuz ayı ortalaması 27,1 0C ve en soğuk ay olan ocak ayı ortalaması ise 7,8 0C olarak gerçekleşmiştir. Nispi nem ortalaması %58,80 olup, en yüksek % 68,3 ile aralık ayında, en düşük

ise % 47,4 ile temmuz ayında ölçülmüştür. Toplam uzun yıllar buharlaşması 1560 mm olup, en yüksek buharlaşma 264 mm ile temmuz ayında, en düşük aylık buharlaşma ise 49,2 mm ile aralık ayında gerçekleşmiştir (UTAEM, 2022).

4.2 Metod

4.2.1 Deneme Konuları

Parsel genişliği dört sıra pamuk ve mısır ekimi planlandığından 2,8 m, parsel uzunluğu ise toprak işleme aletlerinin doğru ve etkin çalışmasını görmek amacıyla 40 m olarak belirlenmiştir. Her parsel 112 m² olacak şekilde toprak işleme konularına göre hazırlanmıştır. Denemede birinci yıl buğday ve buğday sonrası ikinci ürün olarak silajlık mısır, ikinci yıl pamuk ekimi gerçekleştirilmiştir. Denemede tüm tarımsal işlemler eşit bir şekilde uygulanmıştır.

Deneme konuları olan toprak işleme yöntemleri ve konularda kullanılan alet ve makineler aşağıdaki gibidir.

- Geleneksel Toprak İşleme (GTİ): konusunda sırasıyla, pulluk (4 gövdeli 12”), diskli tırmık (28 diskli tandem), toprak sürgüsü (çekme tip) ve son olarak, ekim Makinası (Pamuk: 4 sıralı pnömatik hassas ekim makinası, Buğday: Üniversal hububat ekim makinası) kullanılmıştır.
- Azaltılmış Toprak İşleme (AZ1): Çalışmada iki farklı azaltılmış toprak işleme konusu belirlenmiştir. Bu konular bölgede yaygın olarak kullanılan ekipmanlar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bunlardan birisi goble diskaro (20 diskli ofset) ile

işlemenin arkasından ekim makinası (Pamuk: 4 sıralı pnömatik hassas ekim makinası, Buğday: Üniversal hububat ekim makinası) kullanılması şeklinde uygulanmıştır.

- Azaltılmış Toprak İşleme (AZ2): Diğer azaltılmış toprak işleme konusunda ise toprağı parçalayıp karıştıran bir alet olan çizelli rototiller (Yaklaşık 40 cm derinlikte işleme yapan çizel arkasına rototiller ve merdane kombinasyonu) ile işlemenin arkasından ekim makinası (Pamuk: 4 sıralı pnömatik hassas ekim makinası, Buğday: Üniversal hububat ekim makinası) ile ekim işlemi gerçekleştirilmiştir.

- Doğrudan ekim (DE): Doğrudan ekim konusunda ise diğer konulardan farklı olarak anızlı tarlaya doğrudan ekim yapabilen ekim makinası (Pamuk ve mısır için 4 sıralı doğrudan ekim makinası, buğday için 24 sıralı doğrudan hububat ekim makinası) kullanılmıştır.

4.2.2 CO₂ Emisyonu Ölçümleri

Çalışmanın saha uygulamaları sırasında farklı toprak işleme yöntemleriyle kurulan deneme parsellerinin, çalışma boyunca yapılacak faaliyetlerinden birisi olan CO₂ emisyonlarını ölçmek amacıyla, LI-COR marka LI-8100 Automated Soil CO₂ Flux System Gaz Analizörü kullanılmıştır. Ölçümlerde cihaza 20 cm çaplı LI-COR 8100-103 Model kapalı odacıklı ölçüm başlığı (Survey Chamber) kullanılmıştır. Ölçümler ile eş zamanlı olarak gerçekleştirilen toprak sıcaklığı ve toprak nemi cihaza bağlı nem ve sıcaklık sondaları ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerle anlık CO₂, toprak sıcaklığı ve nem değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerler cihazın veri

hafızasında depolandıktan sonra ara dönemlerde bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Deneme parselleri belirlendikten sonra toprak işleme uygulamalarını gerçekleştirmeden önceki emisyonları belirlemek amacıyla, toprak işleme öncesi CO₂ emisyon miktarları ölçülmüştür.

Tüm konularda toprak işleme işlemleri bitene kadar uygulama yapılan konudan başlamak üzere tüm konularda ölçümler en kısa sürede gerçekleştirilmiştir. Ölçümler her deneme parselinde belirlenen 2 farklı noktadan yapılmıştır. CO₂ analizörü ile yapılan ölçümler her nokta için farklı bloklardan başlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu yolla emisyonların günün farklı zaman dilimlerinde oluşacak değişimlerden en az düzeyde etkilenmesi amaçlanmıştır. Tüm parsellerde ekim işlemi gerçekleştirildikten sonra ilk 24 saatlik zaman diliminde gün içerisindeki değişimlerin ortaya konulması amacıyla gündüz saatlerinde 2 ya da 3 kez, gün batımı sonrası 1 kez olacak şekilde, sırasıyla tüm parsellerde anlık emisyon ölçümleri yapılarak ve cihaza ait data logger da kaydedilerek bilgisayar ortamında oluşturulan veri tabanına aktarımı sağlanmıştır. Ekimlerin tamamlanmasından sonra gün içindeki değişimleri belirlemek amacıyla günün farklı saatlerinde yapılan ölçümlerden sonra yapılacak ölçümler her gün sıcaklık değişimlerinin en az olduğu gün ortası saatlerde (12:00 – 14:00) tekrarlanmıştır. Buradaki amaç saat dilimi kaynaklı ölçüm farklılıklarını en aza indirmektir. Sonbaharda toprak işlemesinden hemen sonraki yapılan ölçümleri takip eden 10 gün boyunca, her gün sıcaklık değişimlerinin en az olduğu gün ortası saatlerde, aynı metotla ölçümler

gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki dönemde hasat sonrasına kadar ölçümler 1 hafta ara gerçekleştirilmiştir.

Tüm parsellerde toprak işleme etkilerinden bağımsız olarak tarımsal işlemler sonrasında (çapalama, gübreleme, sulama, zirai mücadele vs.) belirtilen CO₂ emisyonu ölçüm programına ilave olarak ölçümler gerçekleştirilmiş, yapılan tarımsal işlemlerin CO₂ emisyonuna etkisinin olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

4.2.3 Emisyon Faktörünün Belirlenmesi

22 Temmuz 2014 tarih ve 29068 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren “Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması” hakkında tebliğde emisyon faktörü; tam yanmanın ve diğer tüm kimyasal reaksiyonların tamamlandığının varsayıldığı bir kaynak akışındaki faaliyet verisine ait sera gazının ortalama emisyon oranı olarak tanımlanmıştır. Toprak işleme yöntemlerinin emisyon faktörünü ise birim alandan kaynaklanan toplam emisyon miktarının birim alana bölünmesiyle elde edilen bir katsayı olarak belirtebiliriz. Bu hesaplama yaklaşımı, kabul edilmiş ve küresel ölçekli bir emisyon faktörü katsayısı kullanılarak topraktan atmosfere salınan CO₂ emisyonunun miktarının hesaplanmasında kullanılır. Bu çalışma sonucunda elde edilen CO₂ emisyonu değerleri, IPCC tarafından yayımlanan “Ulusal Sera Gazı Envanterleri Yönergeleri” içinde bulunan yaklaşımlar doğrultusunda hesaplanmıştır (IPCC 2006 a).

$$\text{Emisyon} = A \cdot EF$$

Emisyon : 1 ha. alandan yıllık atmosfere salınan toplam emisyon miktarı (t-1.ha-1.yıl-1)

A : Ölçüm alınan alan (ha)

EF :Emisyon faktörü (t-1.yıl)

Emisyon faktörleri Tier 2 yaklaşımında ülkeye özgü yapılmış araştırmalardan ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılarak hesaplanır. IPCC raporlarında belirtilen katsayılar ve standartlar genellikle uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir (IPCC 2006 b).

Çizelge 1. Tarımsal alanlarda toprak karbon stoklarını etkileyen değişim faktörleri

Faktör	Seviyesi	Sıcaklık rejimi *	Nem Rejimi **	IPCC standardı	Tanım
Toprak işleme	Tam (geleneksel)	Tümü için	Kuru, nemli, ıslak	1.00 -	Yıl içinde tam ve tekrarlı toprak işleme yapılır. Toprak işleme zamanında toprak yüzeyinde <%30 bitki artığı bırakılır.
Toprak işleme	Azaltılmış	Ilıman	Kuru Nemli	1.02 +/- %6 1.08 +/- %5	1. ve 2. toprak işleme toprak daha az karıştırılarak yüzeysel ve tam olmayan işleme şeklinde yapılır. Toprak yüzeyinde <%30 bitki artığı bırakılır.

Toprak işleme	İşlemesiz	Ilıman	Kuru Nemli	1.10 +/- 5 1.15 +/- 4	Temel toprak işleme yapılmaksızın direk ekim yapılır. Tohum yatağı toprak en az karıştırılarak hazırlanır. Yabancı ot herbisit ile yönetilir.
------------------	-----------	--------	---------------	--------------------------	--

*>20 yıllık bir dönem için farklı toprak yönetim faaliyetleri için (Arazi kullanım şekli, toprak yönetimi ve girdi seviyeleri)

** İzmir Ilıman ve nemli iklim bölgesi olarak değerlendiriliyor.

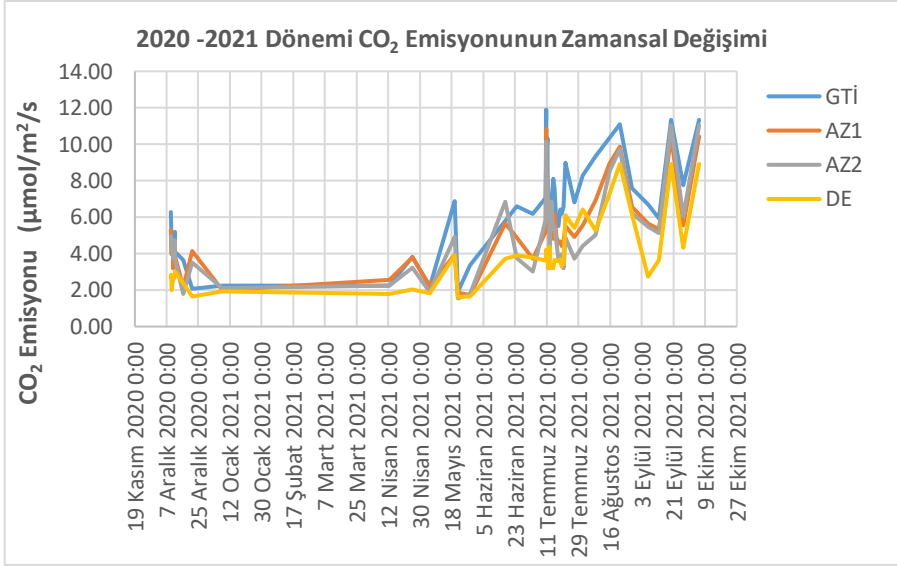
5. Bulgular ve Tartışma

Tezin ilk yılı olan 2020 sonbaharından itibaren ilk toprak işlemenin hemen ardından CO₂ emisyonu ölçümlerine başlanmış ve hasada kadar devam etmiştir. İlk 72 saat içinde her parselde iki farklı noktadan, günün sabah, gün ortası ve gece saatlerinde olmak üzere ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonraki dönemdeki ölçümler metotta belirtildiği şekilde ve periyotlarda yıl boyu devam ettirilerek, elde edilen CO₂ emisyonu değerleri ve zamansal değişimi izlenmiştir. Şekil 1’de ölçümlere ait bir görsel yer almaktadır.



Şekil 1. Buğdayda CO₂ Ölçümü

Yapılan ölçümlerde CO₂ emisyonunun en yüksek olduğu toprak işleme konusu tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın yürütüldüğü 2020 ve 2021 yıllarında yapılan ölçümlerden elde edilen CO₂ emisyonlarının zamansal değişimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. CO₂ Emisyonlarının Zamansal Değişimi

Konulara göre ölçülen CO₂ emisyonları istatistiksel olarak analize tabii tutulmuş olup Çizelge 4.1’de verilmiştir. Denemede konular ve tekerrürler arasındaki fark (P=0,01) önemli çıkmıştır. Tekerrürler arasındaki farkın önemli olması istenilen bir durum olmamakla birlikte toprak bünyesindeki heterojenlik nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Buna göre yapılan çoklu karşılaştırma testi (LSD) grupları da Geleneksel toprak işleme yöntemi 6,43 µmol.m⁻².s⁻¹ CO₂ emisyonu ortalaması ile A grubunda, rototiller+çizel alet-makina kombinasyonu kullanılan azaltılmış toprak işleme 1 yöntemi 5,27 µmol.m⁻².s⁻¹ CO₂ ve

azaltılmış toprak işleme 2 yöntemi 5,10 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ CO₂ emisyonu ortalaması ile B grubunda, doğrudan ekim yöntemi 3,12 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ CO₂ emisyonu ortalaması ile C grubunda yer almıştır.

2022 yılında da aynı metod ile ölçümler gerçekleştirilmiş ve hasat sonrasına kadar devam etmiştir. Elde edilen ölçüm değerleri göz önünde bulundurulduğunda farklı toprak işleme yöntemlerinin, toprak işleme sırasında kullanılan alet ekipmanların seçiminin ve toprak işleme sırasındaki uygulama tekrar sayısının topraktan salınan CO₂ miktarına doğrudan etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Bu etkiyi daha iyi ortaya koymak adına denemenin başladığı 2020 yılı buğday ekim öncesi yapılan ölçümlerden, tamamlandığı 2022 yılı pamuk hasadı sonuna kadar ölçülen tüm CO₂ emisyonu, toprak nemi ve toprak sıcaklığı değerleri yılların da etkisi dikkate alınarak varyans analizi yapılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. CO₂ emisyonu toplu varyans analiz tablosu

Kaynaklar	SD	KT	KO	F	P
YIL	1	0,3174	0,3174	1,4421	0,2530 ö.d
BLOK (Tekerrür)	4	8,1662	2,0416	9,2758	0,0012**
KONU	3	16,2613	4,0653	24,6277	<0,0001**
YIL*YÖNTEM	3	3,5456	1,1819	5,3699	0,0141*
HATA	12	2,6411	0,2201		
GENEL	23	30,9317			
YÖNTEMLERE GÖRE LSD Grupları					
2021 GTİ			6,4333 A		
2022 GTİ			5,5266	B	
2021 AZ1			5,2733	B C	
2021 AZ2			5,1000	B C	
2022 AZ1			4,7233	B C D	
2022 AZ2			4,5600	C D	

2022 DE	4,2000	D
2021 DE	3,1233	E
AÖF	0,835	
Cv %	9,64	

** P=0,01 seviyesinde önemli, * P=0,05 seviyesinde önemli ö.d. Önemli değil

Denemenin başından beri ölçülen tüm CO₂ emisyonu değerlerine yapılan LSD testi sonuçlarına göre azaltılmış toprak işleme konuları A B grubunda yer alırken, geleneksel toprak işleme konusu A grubunda, doğrudan ekim konusu B grubunda yer almıştır. Çizelgede verilen CO₂ değerleri denemenin 2020 yılı sonbaharından, 2022 yılı pamuk hasadına kadar gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen emisyon değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre konular bazında en yüksek ortalama CO₂ emisyonu 5,5266 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ile geleneksel toprak işleme yönteminde elde edilirken, doğrudan ekim konusunda en düşük ortalama CO₂ emisyonu 4,2000 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ile elde edilmiştir.

Son yıllarda koruyucu toprak işleme (conservation tillage), küresel iklim ısınmasının azaltılmasına yönelik önemli ve umut vadeden bir sürdürülebilir tarım yönetimi uygulaması olarak öne çıkmıştır. Bu yöntemin sera gazı akımları üzerindeki etkileri geniş çapta araştırılmış olsa da, azaltılmış toprak işleme (reduced tillage) ve doğrudan ekim (no-tillage) uygulamalarının etkileri konusunda çelişkili sonuçlar bildirilmiştir. 147 yayından elde edilen 1286 eşleştirilmiş gözlem kullanılarak yapılan sistematik bir inceleme, azaltılmış ve doğrudan ekim uygulamalarının dünya genelinde toprak CO₂, N₂O ve CH₄ akımları üzerindeki etkilerini ve bu gazların toplam küresel ısınma

potansiyeli (GWP) ile tarımsal verim üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir.

Bulgulara göre; azaltılmış toprak işleme, N₂O ve CH₄ emisyonlarını sırasıyla %31,0 ve %24,7 artırmakta ve tarımsal verimi %17,4 azaltmakta; CO₂ emisyonları veya CH₄ alımı üzerinde etkisi bulunmamaktadır. Doğrudan ekim, CO₂, N₂O ve CH₄ emisyonlarını ve toplam GWP'yi sırasıyla ortalama %15,1, %7,5, %19,8 ve %22,6 oranında azaltmakta; CH₄ alımı veya tarımsal verim üzerinde olumsuz etkisi bulunmamaktadır. Tarımsal artıkların tutulması, tarım arazisi türü, ekim nöbeti, bitki türü ve toprak fizikokimyasal özellikleri, azaltılmış ve doğrudan ekim uygulamalarının etkilerini düzenlemekte ve bu etkiler sera gazı türüne ve uygulama tipine göre değişiklik göstermektedir. Azaltılmış ve doğrudan ekim uygulamalarında tarımsal verim ile sera gazı akımları arasında genel olarak bir ilişki bulunmamış, yalnızca N₂O emisyonlarında pozitif bir ilişki gözlenmiştir. Bu sonuçlar, doğrudan ekimin sera gazı emisyonlarını azaltırken tarımsal verim üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını ve dolayısıyla iklim ısınmasının azaltılmasında ve gıda güvenliğinin sağlanmasında etkili bir sürdürülebilir tarım yönetimi uygulaması olduğunu göstermektedir (Yue, 2023).

Bu değerler toprak tipine göre de değişkenlik gösterebilir. Zira Çukurova Bölgesi koşullarında yürütülen bir çalışmada geleneksel toprak işleme (GTİ), azaltılmış toprak işleme (ATİ) ve doğrudan ekim (DE) yöntemlerinin, özellikleri birbirinden farklı iki toprak serisinde çeşitli dönemlerde ölçülen CO₂ salımı üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Bu doğrultuda, Çukurova Üniversitesi kampüsü sınırları içinde yer alan

Arık ve Baraj serisine ait buğday ekili arazilerde ekimden önce, ekim sonrasında ve hasat sonrasında olmak üzere üç farklı zamanda CO₂ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, kil bünyeli Arık serisi topraklarında CO₂ salımı ekim öncesinde 6.24 kg/ha gün iken, hasat sonrası bu değer 10.08 kg/ha gün olarak kaydedilmiştir. Ekim dönemine gelindiğinde ise, yüzey organik madde miktarı daha yüksek ve orta tekstüre sahip Baraj serisi topraklarında CO₂ salımının daha fazla olduğu (15.12 kg/ha gün) belirlenmiştir (Turgut, 2019).

Öte yandan toprak işleme sürecinde kullanılan yöntemler; işleme derinliği, toprağın ne kadar karıştırıldığı, kullanılan ekipman tipi ve ekipmanın ayarları gibi unsurlara bağlı olarak çeşitli toprak fiziksel özelliklerini ve toprak CO₂ emisyonunu etkilemektedir (Akbolat, 2021).

Benzer şekilde yapılan başka bir araştırmada, agroekosistemlerin yönetimi, küresel karbon döngüsünde kritik bir rol oynamaktadır; zira toprak işleme, topraklar içinde bilinen organik karbon yeniden dağılımlarına ve toprak CO₂ emisyonlarında değişikliklere yol açmaktadır. Bununla birlikte, toprak işlemenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi ve temel toprak ile çevresel kontrol faktörleri konusunda çeşitli farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu bağlamda, farklı iklimler, bitki türleri ve toprak koşullarında işlenmiş ve işlenmemiş topraklarda tüm sezon veya yıllık CO₂ emisyonlarını karşılaştıran 46 hakemli yayın ve toplam 174 eşleştirilmiş gözlemi kapsayan bir meta-analiz gerçekleştirilmiştir. Analizin amacı, toprak işlemenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini nicel olarak belirlemek ve ana kontrol faktörlerini değerlendirmektir. Ortalama olarak, işlenmiş

topraklar işlenmemiş topraklara kıyasla %21 daha fazla CO₂ salımı gerçekleştirmiştir ve bu fark istatistiksel olarak $P < 0,05$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Fark, düşük toprak organik karbon içeriğine (SOCC < %1) ve düşük toprak nemine sahip arid iklimlerdeki kumlu topraklarda %29'a kadar çıkarken, yüksek temel organik karbon içeriğine sahip (> %3) kil topraklarda toprak işlemenin CO₂ akışları üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir. Son olarak, azot gübrelemesi ve bitki artığı yönetimi, işlenmemiş toprakların CO₂ tepkileri üzerinde belirgin bir etki yaratmamıştır. Bu bulgular, işlenmemiş tarımın kuru topraklarda karbon kayıplarını azaltmak için etkili bir önlem olduğunu göstermektedir. Ayrıca, karbon döngüsünün küresel modellerinde toprak faktörleri (doku, agregat stabilitesi ve organik karbon içeriği) ile ilgili bilgilerin dahil edilmesinin önemini vurgulamaktadır (Abdalla, 2016).

Macaristan'da yapılan diğer bir çalışmada, en sürdürülebilir ve ekolojik açıdan dengeli toprak işleme tekniklerinin seçimi, başarılı müdahaleler ve kanıta dayalı karar verme süreçleri için kritik öneme sahip olan uzun dönemli saha denemelerine dayanmalıdır. Bu araştırmada, uzun dönemli (23 yıl) bir toprak işleme deneyi kapsamında, farklı toprak bozulma düzeylerini temsil eden altı toprak işleme yöntemi altında çeşitli faktörler değerlendirilmiştir. Bu faktörler arasında toprak biyolojik aktivitesi (CO₂ emisyonu), toprak kimyasal özellikleri (pH (KCl), toprak organik maddesi (SOM)), bitki büyüme fizyolojik göstergeleri (Yaprak Alan İndeksi (LAI), Toprak ve Bitki Analiz Gelişimi (SPAD)), ürün verimi ve tane kalitesi (Zeleny indeksi, protein %, yağ %, ve gluten % içeriği) yer almaktadır. Çalışmada,

konvansiyonel toprak işleme (sürüm (P)) ile koruyucu toprak işleme teknikleri (gevşetme (L), derin işleme (DC), sığ işleme (SC), diskleme (D) ve doğrudan ekim (NT)) üç yıl boyunca (2022, 2023 ve 2024) kış arpası–soya–kış buğdayı ekim sistemi üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar, toprak işleme yoğunluğunun toprak biyolojik parametreleri üzerinde farklı etkiler yarattığını göstermekte olup, SPAD değerlerinde uygulamalar arasında küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bulgular, belirli yıllarda CO₂ emisyonları, LAI değerleri ve tane kalitesinde anlamlı değişiklikler olduğunu ortaya koymakta ve bunun muhtemelen P ve L işleme uygulamalarının etkisinden kaynaklandığını göstermektedir.

Bu çalışmanın yeniliği, kısa vadeli toprak işleme uygulamalarının, dalgalanan iklim koşulları altında bitki fizyolojik parametreleri ve ürün verimi üzerindeki etkilerinin minimal olmasına rağmen, uzun vadeli toprak işleme uygulamalarının mevcut farklılıkları önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymasındır. Bu durum, sürdürülebilir tarımsal üretimde yer ve iklim koşullarına özel, iklime dayanıklı toprak işleme stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır (Bozoki, 2025).

Farklı toprak işleme yöntemlerinin uygulanması sonrasında çalışmanın gerçekleştiği 2 yıl boyunca elde edilen yıllık emisyon değerleri yıllık ve ortalama değerler olarak ele alınmıştır. Elde edilen yıllık emisyon değerlerinden yola çıkılarak tersinir hesap yöntemi ile toprak işleme yöntemlerinin EF değerleri hesaplanarak Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 5.1. Toprak işleme sistemlerinin emisyon faktörleri

ÖLÇÜLEN YILLIK CO₂ EMİSYONU MİKTARI (t/ha/Yıl)			
	2021	2022	ortalama
GTİ	85,0761	73,6887	79,3824
AZ1	70,0098	66,5833	68,2965
AZ2	67,9130	65,5434	66,7282
DE	51,5025	49,5606	50,5315
EF			
	2021	2022	ortalama
GTİ	1	1	1
AZ1	1,22	1,11	1,16
AZ2	1,25	1,12	1,19
DE	1,65	1,49	1,57

Çizelgede verilen emisyon faktörleri ülkesel sera gazı envanteri hesaplamasında kullanılarak, toprak işleme kaynaklı CO₂ emisyonu hacmi yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Çizelgede verilen emisyon faktörü toprak işleme yöntemlerinin bir hektarlık alandan bir yılda salınan CO₂ miktarına karşılık gelen değerdir.

Elde edilen EF değerleri, Ülkemiz nemli ve ılıman iklim kuşağında bulunan İzmir İli Menemen İlçesinde, 2 yıl aralıksız yapılan anlık CO₂ emisyonu değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.11 incelendiğinde, verilen EF değerleri, temsil ettiği toprak işleme yöntemi kullanılan alanla çarpılmak suretiyle, CO₂ emisyonu miktarının azaltılmasına ne kadar katkı sağlanabileceğini göstermektedir. Diğer bir deyişle kullanılan yöntemle göre ne kadar CO₂'nin toprakta tutulacağını göstermektedir.

Emisyon faktörleri Tier 2 yaklaşımında ülkeye özgü yapılmış araştırmalardan ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılarak hesaplanır. IPCC raporlarında belirtilen katsayılar ve

standartlar genellikle uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir (IPCC 2006 b). Ancak bu çalışmadan elde edilen değerlerin 2 yıl süren bir çalışmadan üretildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Daha uzun süren çalışmalardan elde edilen yıllık değerlerin ortalamasının alınması yoluyla doğruluğu daha yüksek sonuçlar elde edilmesi mümkündür.

6. Sonuç ve Öneriler

2020 – 2022 yılları arasında yürütülen bu çalışmada ölçülen CO₂ emsiyonu değerleri bize göstermiştir ki; uygulanan farklı toprak işleme yöntemleri, toprak işlemede kullanılan alet ve ekipmanların seçimi ve kullanılan ekipmanların işlem tekrar sayısı topraktan salınan CO₂ miktarına doğrudan etkilidir.

Her ne kadar elde edilen veriler istatistiksel olarak bu tezi doğrulaması da, bulgular ışığında toprak neminin ve toprak sıcaklığının CO₂ emisyonuna doğrudan etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Bu etki mevsimsel değişimlere de bağlı olarak zaman zaman güçlü, zaman zaman da zayıf hissedilmiştir. Ancak özellikle toprak sıcaklığının artmaya başladığı ilkbahar ve yaz aylarında CO₂ emisyonu değerlerindeki paralel artış tüm konularda görülmüştür. Bu artış doğrudan ekim ve azaltılmış toprak işleme konularında nispeten daha sınırlı olmuştur.

Ölçümler yetiştiricilik sırasında yapılan tarımsal uygulamalardan hemen sonra tekrarlanarak CO₂ emisyonuna etkileri araştırılmıştır. Buna göre ara toprak işlemesi yapılan günlerde emisyon miktarının arttığı tespit edilmiştir. Ancak sulamada daha farklı bir

durum ortaya çıkmıştır. Bazı sulama uygulamaları sonrasında CO₂ emisyonu miktarlarında ani bir artış gözlemlenirken bazı sulamalardan hemen sonra yapılan ölçümde ise tam aksine ani bir düşüş görülmüştür. Bu durum; sulama sonrası toprak yüzeyinde meydana gelen kaymak tabakasının farklı ölçümlerde farklı sonuçları ortaya çıkardığı şeklinde yorumlanmıştır.

Günün farklı saatlerinde yapılan ölçümler değerlendirildiğinde en düşük emisyon değerleri gün batımından sonraki saatlerde gerçekleştirilmiştir. Bu durumun topraktaki mikroorganizmal faaliyetlerin yavaşlamasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda toprak işleme faaliyetlerinin gün batımı ya da sabah erken saatlerde yapılması daha düşük CO₂ emisyonuna sebep olabilir. Sera gazı emisyonları açısından daha avantajlı olacağı için toprak işlemede bu saatlerin tercih edilebilir ya da çiftçilere bu saatler tavsiye edilebilir.

Tez çalışmamızda yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi, elde edilen değerler ışığında CO₂ emisyonlarının azaltılması bakımından doğrudan ekim ve diğer koruyucu toprak işleme yöntemlerinin oldukça avantajlı olduğunu söyleyebiliriz.

Emisyon miktarının düşürülmesi amacıyla geleneksel toprak işleme yerine doğrudan ekim tercih edilmesi durumunda %15 - 25 oranında bir azalma sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Benzer sonuçların elde edildiği tüm çalışmalardan elde edilen veriler ışığında koruyucu toprak işleme yöntemlerinin tercih edilmesi yoluyla, tarım kaynaklı CO₂ emisyonu miktarlarının düşürülmesi mümkün görülmektedir.

Elde edilen EF değerleri, Ülkemiz nemli ve ılıman iklim kuşaaında bulunan İzmir İli Menemen İlçesinde, 2 yıl aralıksız yapılan anlık CO₂ emisyonu değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan EF değerleri, temsil ettiği toprak işleme yöntemi kullanılan alanla çarpılmak suretiyle, CO₂ emisyonu miktarının azaltılmasına ne kadar katkı sağlanabileceğini göstermektedir. Diğer bir deyişle kullanılan yöntemle göre ne kadar CO₂'nin toprakta tutulacağını göstermektedir.

Emisyon faktörleri Tier 2 yaklaşımında ülkeye özgü yapılmış araştırmalardan ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanılarak hesaplanır. IPCC raporlarında belirtilen katsayılar ve standartlar genellikle uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir (IPCC 2006 b). Ancak bu çalışmadan elde edilen değerlerin 2 yıl süren bir çalışmadan üretildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Daha uzun süren çalışmalardan elde edilen yıllık değerlerin ortalamasının alınması yoluyla doğruluğu daha yüksek sonuçlar elde edilmesi mümkündür.

2020 – 2022 yılları arasında Türkiye Akdeniz iklim kuşaaında yeralan İzmir Menemen bölgesinde yürütölen bu çalışmada doğrudan ekim yapılması durumunda 10 yıllık bir süre sonunda yaklaşık 8 ton/ha karbon kazandırılabilceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadan da anlaşılaçağı üzere benzer şekilde tez çalışmamızda yapılan işlemler daha uzun bir süre devam ettirildiği takdirde yüksek miktarlarda karbonun toprakta kalması mümkün olabilecektir.

Yapılan bu çalışmaların yayılması yoluyla hem tarımla uğraşan tüm sektör temsilcilerinin, hem de çiftçilerin daha çevreci yaklaşımlar ile yetiştiricilik yapması söz konusu olabilecek, bölgesel ve ülkesel

ölçekçe sera gazlarının salımlarının azaltılmasına katkı sağlanması mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

- Abdalla, K., Chivenge, P., Ciaia, P., and Chaplot, V. (2016). No-tillage lessens soil CO₂ emissions the most under arid and sandy soil conditions: results from a meta-analysis, *Biogeosciences*, 13, 3619–3633, <https://doi.org/10.5194/bg-13-3619-2016>
- Adam, D., (2007). Environment Correspondent. Saturday January 27, The Guardian Agriculture Problems and Solutions.
- Anonymous, (2010a) European Commission. Commission Directive 2010/26/EU of 31 March 2010 amending Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. *Dz. Urz. UE L* 2010, 86, 29.
- Anonymous, (2010b). European Commission. Commission Directive 2010/22/EU of 15 March 2010 amending for the purposes of adapting to technical progress Council Directives 80/720/EEC, 86/298/EEC, 86/415/EEC and 87/402/EEC and Directives 2000/25/EC and 2003/37/EC of the European Parliament and of the Council relating to the type-approval of agricultural or forestry tractors. *Dz. Urz. UE L* 2010, 91, 1.
- Anonymous, (2019). European Parliament. CO₂ Emissions from Cars: Facts and Figures (Infographics). Available online: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>

Published: 22-03-2019, Last updated: 06-12-2024 - 15:16
(accessed on November 2025).

- Anonymous (2020). İklim Değişikliği ve Tarım. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü Raporu. <https://www.tarimorman.gov.tr/TRGM/Belgeler/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fi%20ve%20Tar%C4%B1m.pdf> Erişim tarihi:05.12.2025
- Akbolat, D., Güngör, Z. (2021). Rototiller Arka Kapak Yüksekliğinin Toprağı Sıkıştırma, Parçalama ve Karbondioksit Emisyonu Üzerine Etkisi. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi. Ziraat Fakültesi Dergisi, Cilt 16, Sayı 2, Sayfa 214-219, 2021.
- Bateman, H.P., (1959). Effect Of Basic Tillage Methods and Soil Compaction on Corn Production. University of Illinois, Agr. Exp. Station, B: 645.
- Bozóki, B.; Bogale, A.A.; Khaeim, H.; Kende, Z.; Simon, B.; Kovács, G.P.; Gyuricza, C. Impact of Soil Tillage Systems on CO2 Emissions, Soil Chemical Parameters, and Plant Growth Physiological Parameters (LAI, SPAD) in a Long-Term Tillage Experiment in Hungary. Agriculture 2025, 15, 1810. <https://doi.org/10.3390/agriculture15171810>
- Eyüpoğlu, F., (1999). Türkiye Topraklarının Verimlilik Durumları. T.C. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Yayınları. Genel Yayın No:220, Teknik Yayın No: T-67, 122 s. Ankara.

- FAO. (2009), Coping with a changing climate: considerations for adaptation and mitigation in Agriculture Environment And Natural Resources, Management Series 15.
- Faulkner, E. H., (1943). Plowman's Folly. The University of Oklahoma Press: Norman. Ninth printing 1963, 156 pp.
- Franzluebbers, A. J., Hons, F.M., Zuberer, D.A. 1995. Soil Organic Carbon, Microbial Biomass, and Mineralizable Carbon and Nitrogen in Sorghum. Soil Science Society of America Journal. Vol. 59 No. 2, p. 460-466. İklim Değişikliği Koordinasyon Kurulu Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık Çalışma Grubu Raporu. 2006 Ankara.
- Ghosh, D., Ghorai, P., Debnath, S., Roy, D., Samanta, A., Maiti, K.S., Sarkar, S., Roy, D., Sarkar, K., Banerjee, R. 2022. Chapter 6 - Impression of Climatic Variation on Flora, Fauna, and Human Being: A Present State of Art. Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence Elsevier 2023, Pages 101-122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99714-0.00004-2>
- Gök, M., Onaç, I., 1995. Hilvan ve Baziki ovalarında yer alan yaygın toprak serilerinin bazı mikrobiyolojik özellikleri. Toprak İlmi Derneği İlhan Akalan Toprak ve Çevre Sempozyumu. Ankara.
- Gökçebay, B., (1988). Birleştirilmiş Tohum Yatağı Hazırlığı ve Ekim Yöntemlerinin Toprak Fiziksel Özellikleri ve Verim Üzerine Etkileri. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yay No: 1033, Ankara.

- Gu, Y.; Yim, S.H.L. The Air Quality and Health Impacts of Domestic Trans-Boundary Pollution in Various Regions of China. *Environ. Int.* 2016, 97, 117–124.
- Hansson, P.A., Lindgren, M., Noren, O. A. (2001). Comparison Between Different Methods of Calculating Average Engine Emissions for Agricultural Tractors. *J. Agric. Engng Res.* 2001, 80, 37–43.
- IPCC, (2006a). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Annex 2 Summary of Equations.
- IPCC, (2006b). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 5 Cropland. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- substitutes. *Biosyst. Eng.* 2010, 107, 123–130. [Google Scholar] [CrossRef]
- Janulevičius, A., Juostas, A., Pupinis, G., (2013). Tractor's engine performance and emission characteristics in the process of ploughing. *Energy Convers. Manag.* 2013, 75, 498–508
- Janulevičius, A., Juostas, A., Cipliene, A., (2017). Nitrogen-oxide emissions from diesel-engine farm tractors during real-life cycles and their correlation with the not-to-exceed operating zones. *Biosyst. Eng.* 2017, 161, 93–105.
- Karakaya, E., Özçağ, M., 2003. Türkiye Açısından Kyoto Protokolü'nün Değerlendirilmesi Ve Ayırıştırma (Decomposition) Yöntemi İle CO₂ Emisyonu Belirleyicilerinin Analizi VII. ODTÜ Ekonomi Konferansı . Ankara

- Lee, H., Romero, J (2023): Synthesis Report, 1st ed.; IPCC: Geneva, Switzerland, Climate Change 2023; pp. 35–115.
- Li, Y.X.; McLaughlin, N.B.; Patterson, B.S.; Burt, S.D. Fuel efficiency and exhaust emissions for biodiesel blends in an agricultural tractor. *Can. Biosyst. Eng.* 2006, 48, 15–22.
- Lovarelli, D.; Bacenetti, J. Exhaust Gases Emissions from Agricultural Tractors: State of the Art and Future Perspectives for Machinery Operators. *Biosyst. Eng.* 2019, 186, 204–213.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., Pierrehumbert, R. (2021). Agriculture's Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct from Predominantly Fossil CO₂-Emitting Sectors. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 518039.
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M.G., Sapkota, T., et al. (2019). Food Security. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*; Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Eds.; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Geneva, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/IPCCJ7_230-Land_SM5_200226.pdf
- Nelson, P.F. Tibbett, A.R., Day, S.J. (2008). Effects of vehicle type and fuel quality on real world toxic emissions from diesel vehicles. *Atmos. Environ.* 2008, 42, 5291–5303.

- Parry, M., (2000). Assessment of Potential Effects and Adaptations to Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project, Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich.
- Paustian, K., O. Andr  n, H. H. Janzen, R. Lal, P. Smith, G. Tian, H. Tiessen, M. Van Noordwijk, P. L. Woomer, 1997. Agricultural Soils as A Sink to Mitigate CO₂ Emissions Soil Use and Management 13 (s4), 230–244
- Pascuzzi, S.,   yp-Wro  ska, K., Gdowska, K., Paciolla, F. (2024). Sustainability Evaluation of Hybrid Agriculture-Tractor Powertrains. Sustainability, 16, 1184.
- Perozzi, D.; Mattetti, M.; Molari, G.; Sereni, E. Methodology to analyse farm tractor idling time. Biosyst. Eng. 2016, 148, 81–89.
- Renius, K.T. Fundamentals of Tractor Design; Springer: Cham, Switzerland, 2020; p. 287.
- Resmi Gazete, (2014). Sera Gazı Emisyonlarının   zlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebli  . 22 Temmuz 2014 Sayı: 29068. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/07/20140722-5.htm>. Eri  im Tarihi : 05.12.2025
- Salinas-Garcia, J.R., Velazquez-Garcia, J. De J., Gallardo-Valdez, M., Diaz-Mederos, P., Caballero-Hernandez, F., Tapia-Vargas, L.M., Rosales-Robles, E., 2002. Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-western Mexico. Soil and Tillage Research. Volume 66, Issue 2, July 2002, Pages 143–152.

- Schinner, F., (1986). Die Bedeutung der Mikroorganismen und Enzyme im Boden. II. Seminar; Die Adwendung Enzymatischer und Mikrobiologischer Methoden in der Bodenanalyse. 5-6 juni, Linz.
- Sokal, K., Kachel, M. (2025). Impact of Agriculture on Greenhouse Gas Emissions—A Review. MDPI. *Energies* 2025, 18(9), 2272; <https://doi.org/10.3390/en18092272>
- Topraksu, (1971). Menemen Ovası Temel Toprak Etüdü. Topraksu Genel Müdürlüğü Toprak ve Etüd Haritalama Dairesi Raporları, Seri No: 24, Ankara.
- Turgut, M.M.,Koca, Y.K. (2019). Farklı toprak işleme yöntemlerinin iki farklı toprak serisinde CO₂ salımına etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi* 7(1) 51- 56 51.
- Utaem, (2022). Menemen Hidrometeoroloji Rasat Verileri Yıllığı. İzmir.
- Williford, J.R., (1980). A Controlled-Trafic System for Cotton Production. *Transaction of the ASAE*, 23(1):65–70
- Yue, K., Fornara, D.A., Heděnec, P., Wu, Q., Peng, Y., Peng, X., Xiangyin Ni, X., Wu, F., Penuelas, J. (2023). No tillage decreases GHG emissions with no crop yield tradeoff at the global scale. *Soil and Tillage Research*, 228:105643. DOI:10.1016/j.still.2023.105643
- Zhang, Q.; Jiang, X.; Tong, D.; Davis, S.J.; Zhao, H.; Geng, G.; Feng, T.; Zheng, B.; Lu, Z.; Streets, D.G.; et al. Transboundary Health Impacts of Transported Global Air Pollution and International Trade. *Nature* 2017, 543, 705–709.

BÖLÜM 8

MARDİN İLİNDE TARIMSAL ARTIKLARINDAN ENERJİ ÜRETİM POTANSİYELİ*

Prof. Dr. Cengiz KARACA

GİRİŞ

Enerji, ekonomik kalkınmanın temel yapı taşlarından biridir ve kişi başına düşen enerji tüketimi, yaşam standartlarının önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Günümüzde enerji kaynakları üç ana gruba ayrılmaktadır: fosil yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji. Fosil kaynakların sınırlı olması ve kullanım süreçlerinin çevreye olan olumsuz etkileri, sürdürülebilir ve çevreci alternatif kaynaklara yönelimi zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, özellikle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de artan bir önem kazanmıştır (Karaca, 2015).

Türkiye'nin artan enerji ihtiyacının büyük bir kısmı hâlâ ithal kaynaklarla karşılanmaktadır. Bu durum, ülkenin dışa bağımlılığını artırmakta ve cari açığa doğrudan katkı sunmaktadır. Bu bağlamda yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı hem enerji güvenliği açısından hem de ekonomik sürdürülebilirlik bakımından büyük bir önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyokütle enerjisi, özellikle tarım ülkesi olan Türkiye için stratejik bir potansiyele sahiptir.

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

Tarımsal üretim sonucunda ortaya çıkan atıklar, çoğu zaman gübreleme, hayvan yemi veya doğrudan yakma gibi geleneksel yöntemlerle değerlendirilmekte ya da hiç kullanılmadan doğada bırakılmaktadır. Oysa bu atıklar uygun teknolojilerle değerlendirildiğinde hem yerel düzeyde enerji üretimine katkı sunabilir hem de çevresel atık yükünü azaltabilir. Tarımsal atıklar, bitkisel üretim sonucu oluşan atıklar, hayvansal üretim sonucunda oluşan atıklar ve tarım ürünlerinin işlenmesi sonucu oluşan atıklar olmak üzere üç grupta incelenir. Bitkisel üretim sonucu oluşan atıklar ise tarla ürünleri üretimi sonucunda oluşan atıklar ve bahçe ürünleri yetiştiriciliği sonucu daha çok budama atıklarından oluşan atıklar olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Başçetinçelik vd., 2006).

Tarımsal atıkların enerji üretimi amacıyla kullanılması sonucunda ekonomik ve çevresel olmak üzere iki temel fayda sağlanmış olur. Ekonomik fayda olarak ithal yakıt tüketiminin azalması, bölgesel kalkınma ve istihdam artışı sağlaması sayılabilir. Çevresel fayda olarak ta sera gazı emisyonlarının azaltılması (CO_2 nötr olarak kabul edildiğinden), doğal kaynakların korunması ve fosil yakıt tüketiminin azaltılması sayılabilir. Ülkemizde her yıl büyük miktarlarda tarımsal atık çıkmasına karşın, bu atıkların kullanım oranları oldukça düşüktür. Tarımsal atıklar, enerji üretimi için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Tarımsal atıklar var olan potansiyellerine rağmen enerji kaynağı olarak gerektiği şekilde değerlendirilememektedir. Bu atıklar daha çok gübre amacıyla toprağa gömülmemekte, üretim alanı çevresinde toplanarak doğrudan yakılmakta ya da çürümeye bırakılmakta veya hayvan yemi amacı ile depolanmaktadır.

Mardin ili, geniş tarım alanları, iklim çeşitliliği ve çok çeşitli ürün desenine sahip olması nedeniyle önemli bir tarımsal üretim merkezidir. Bu çalışma, Mardin ilinde tarımsal üretimden kaynaklanan artıkların miktarını ve bu artıkların biyokütle enerjisi üretimi açısından taşıdığı potansiyeli ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin, yerel yönetimler ve enerji politikası yapımcıları için yol gösterici nitelikte olması hedeflenmektedir.

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. Mardin 325,073 ha tarım alanına sahiptir. Tarım arazilerinin %80.48'ini tarla bitkileri, %15.3'ünü meyve alanları ve geri kalanını ise sebze ve nadas alanları oluşturmaktadır (TÜİK, 2025a). İl genelinde tarımı yapılan en önemli ürünler buğday, arpa, mısır, pamuk, mercimek, üzüm, antepfıstığı, kiraz ve zeytindir.

Bu çalışmada, Mardin iline ait tarımsal üretimden kaynaklanan artık miktarları, 2024 yılı TÜİK bitkisel üretim istatistikleri esas alınarak belirlenmiştir (TÜİK, 2025b). Bitkisel kökenli artıklar, iki ana grupta değerlendirilmiştir. Bu gruplardan ilki tarla ürünleri (buğday, arpa, mercimek, mısır vb.) üretiminden elde edilen sap, saman gibi kalıntılar, ikincisi ise bahçe bitkileri (kiraz, üzüm, zeytin, antepfıstığı vb.) yetiştiriciliğinde oluşan budama artıklarıdır. Tarımsal artıkların yıllık brüt potansiyeli, artık ürün oranı (RPR) kullanılarak belirlenmiştir (Tablo1). Artıkların net potansiyeli ise, kullanılabilirlik değerleri

kullanılarak belirlenmiştir. Artıkların kullanılabilirlik değeri tarımsal üretim sonucunda oluşan artıkların hiç yerde kullanılmayan tamamen atık olan kısmını belirtmektedir. Bazı tarımsal artıklar halihazırda ısınma, hayvan yemi, altlık gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Çoğunlukla endüstri bitkileri olarak bilinen ürünlerin üretiminden kaynaklanan mısır sapı, ayçiçeği sapı tahılların samanı, budama vb. artıklar tarlada kalmaktadır.

Mardin ilinin her ilçesinde tarımsal artıkların enerji dönüşümü amacıyla kullanılabilir potansiyeli her bir ürün için Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$(AAR)_i = (AAP)_i \times (RPR)_i \times (A)_i \quad (1)$$

$(AAR)_i$: Kullanılabilir tarımsal artık miktarı, (ton)

$(AAP)_i$: Tarımsal ürün miktarı, (ton veya ağaç sayısı)

$(RPR)_i$: Artık-ürün oranı

$(A)_i$: Artıkların kullanılabilirlik oranı, (%)

i : Ürün tipi

Her bir artığın oluşturduğu enerji potansiyeli, Tablo 1 'de verilen ısı değeri ile kullanılabilir artık miktarının çarpılmasıyla hesaplanmıştır. (Eşitlik 2)

$$(THV)_i = (AAR)_i \times (LHV)_i \quad (2)$$

$(THV)_i$: Tarımsal artıkların toplam ısı değeri, (GJ)

$(AAR)_i$: kullanılabilir tarımsal atık miktarı, (ton)

$(LHV)_i$ artığın alt ısı değeri, (MJ kg⁻¹)

Tablo 1. Tarımsal artıkların ürün atık oranı, kullanılabilirliği ve ısı değeri (Başçetinçelik vd., 2006; Karaca, 2015; Karaca 2019)

Tarla Ürünleri	Artıklar	Ürün atık oranı (RPR)	Kullanılabilirlik (A) (%)	Isıl değer (LHV) (MJ kg ⁻¹)
Buğday	Saman	1.45	15	17.9
Arpa	Saman	1.40	15	17.5
Mercimek	Saman	1.50	60	17.9
Nohut	Saman	1.10	60	18.1
Mısır	Sap	2.50	60	18.5
	Koçan	0.30	60	18.4
Pamuk	Sap	2.00	60	18.2
	Çırçır artığı	0.30	80	15.7
Ayçiçeği	Sap	2.00	60	14.2
Bahçe ürünleri				
Elma	Budama	2.50*	80	17.0
Armut	Budama	2.50*	80	16.7
Kayısı	Budama	5.80*	80	19.3
Kiraz	Budama	5.90*	80	16.7
Vişne	Budama	5.00*	80	18.0
Erik	Budama	7.00*	80	17.3
İncir	Budama	4.50*	80	15.8
Nar	Budama	9.00*	80	17.0
Ceviz	Budama	3.50*	50	19.0
Badem	Budama	5.80*	80	18.4
Şeftali & Nektarin	Budama	7.00*	80	19.4
Üzüm bağı	Budama	4,250**	80	18.0
Antep fıstığı	Budama	6.75*	80	19.0
Zeytin	Budama	4.00*	80	19.7

* RPR kg/ağaç

** RPR kg/ha

Ayrıca her ilçe için hesaplanan tarımsal artıkların toplam miktarı ve enerji potansiyelleri bir CBS yazılımı kullanılarak haritalanmıştır. Yapılan haritalarda ilçeler arası veri farklılıklarının daha net görülmesi sağlanmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Mardin ilinde tarla ürünleri artıkları ve bahçe ürünleri budama artıkları dahil olmak üzere toplam tarımsal artık miktarı yaklaşık 968,904 ton olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Toplam artık içerisinde bu

grupların dağılımına bakıldığında, tarla ürünlerinin %86.63 (839.33 kt) ve bahçe ürünlerinin %13.37 (129.57 kt) şeklinde paylara sahip olduğu görülmektedir. Toplam artıklar içerisindeki payına göre başlıca ürünler mısır (%58.6), buğday (%19.4), üzüm bağı (%12.6), pamuk (%4.5) mercimek (%1.9) ve arpa (%1.6) olmuştur.

Tablo 2. Mardin ilinin tarımsal ürün miktarı ve kullanılabilir artık potansiyeli

Tarla ürünleri	Üretim miktarı (AAP)(ton)	Artıklar	Kullanılabilir artık (AAR) (ton)
Buğday	864,632	Saman	188,057
Arpa	75,478	Saman	15,850
Mercimek	20,282	Saman	18,254
Nohut	5,904	Saman	3,897
Mısır	337,773	Sap	506,660
	337,773	Koçan	60,799
Pamuk	30,473	Sap	36,568
	30,473	Çırçır artığı	7,314
Ayçiçeği	1,613	Sap	1,936
Bahçe ürünleri			
Elma	32,543	Budama	72
Armut	18,430	Budama	42
Kayısı	32,620	Budama	159
Kiraz	156,155	Budama	922
Vişne	5,787	Budama	23
Erik	16,680	Budama	102
İncir	52,885	Budama	201
Nar	89,720	Budama	685
Ceviz	59,273	Budama	108
Badem	298,526	Budama	1,425
Şeftali & Nektarin	17,170	Budama	104
Üzüm bağı	34,519*	Budama	121,615
Antep fıstığı	342,216	Budama	1,848
Zeytin	365**	Prina	148
	409,538	Budama	2,115
TOPLAM			968,904

* Üretim alanı (ha)

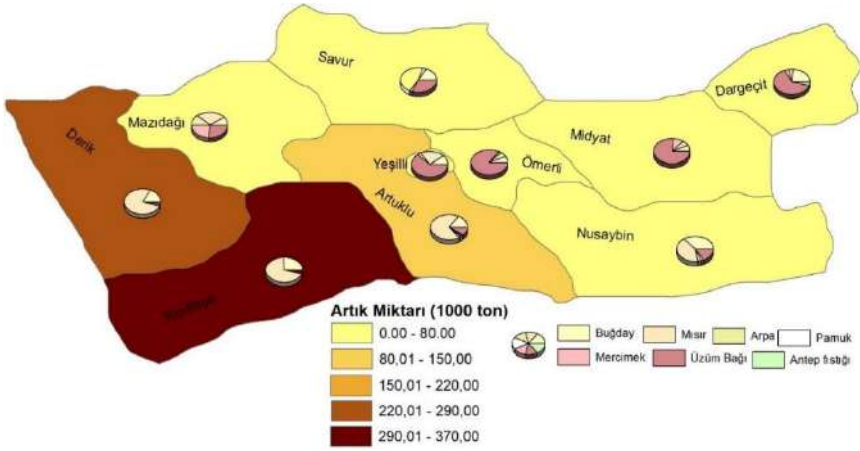
** Üretim miktarı (ton)

Mardin ilinin tüm ilçelerinin tarımsal artık miktarları Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca her ilçe için bir CBS yazılımı kullanılarak haritalanan tarımsal artıkların dağılım haritası Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 3. Mardin ili ilçeleri tarımsal artık miktarları

İlçeler	Tarla bitkileri artıkları (ton)	Bahçe bitkileri artıkları (ton)	Toplam artıklar (ton)	Toplam içindeki payı (%)
Artuklu	119,805	13,010	132,815	13.71
Dargeçit	6,081	11,347	17,428	1.80
Derik	248,818	5,576	254,394	26.26
Kızıltepe	359,659	3,695	363,354	37.50
Mazıdağı	16,077	5,971	22,048	2.28
Midyat	14,728	41,412	56,140	5.79
Nusaybin	40,342	7,774	48,116	4.97
Ömerli	4,143	23,004	27,147	2.80
Savur	27,022	13,111	40,133	4.14
Yeşilli	2,659	4,669	7,328	0.76
Toplam	839,334	129,570	968,904	100.00

En fazla tarımsal atık potansiyeline sahip ilçeler Kızıltepe (%37.5), Derik (%26.26) ve Artuklu (%13.71) şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 1. Mardin ilinin tarımsal artık miktarı dağılım haritası

İlçelerde tarımsal artık kaynağı olan ürünlere bakıldığında mısır, buğday ve üzüm bağı artıklarının yoğunlukları görülmektedir (Şekil 1).

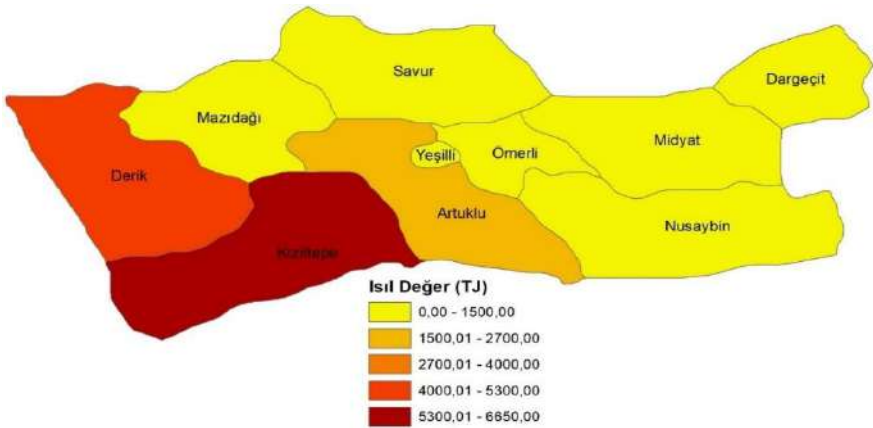
Karaca (2022) tarafından yapılan bir çalışmada Bilecik ili tarımsal artık potansiyelinin 47.8 bin ton olduğu belirlenmiştir. Başka bir çalışmada Karaca (2023) tarafından Gaziantep ilinin tarımsal artık potansiyeli 373.42 bin ton olarak verilmiştir. Kayseri ili için yapılan bir diğer çalışmada ilin toplam tarımsal artık potansiyeli 297.52 bin ton olarak belirlenmiştir (Karaca, 2024). Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde Mardin ili tarımsal artık potansiyelinin önemli bir değere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Mardin ili tarımsal artıklarının toplam ısı değeri

Tarla ürünleri	Artıklar	Toplam Isıl Değer (THV) (GJ)
Buğday	Saman	3,366,229
Arpa	Saman	277,382
Mercimek	Saman	326,743
Nohut	Saman	70,529
Mısır	Sap	9,373,201
	Koçan	1,118,704

Pamuk	Sap	665,530
	Çırçır artığı	114,822
Ayçiçeği	Sap	27,486
Bahçe ürünleri		
Elma	Budama	1,232
Armut	Budama	707
Kayısı	Budama	3,064
Kiraz	Budama	15,396
Vişne	Budama	417
Erik	Budama	1,768
İncir	Budama	3,180
Nar	Budama	11,643
Ceviz	Budama	2,061
Badem	Budama	26,215
Şeftali & Nektarin	Budama	2,012
Üzüm bağı	Budama	2,189,075
Antep fıstığı	Budama	35,111
Zeytin	Prina	2,912
	Budama	38,289
TOPLAM		17,673,709

Mardin ilinde 2024 yılı üretim döneminde tarımsal artıkların toplam ısııl değerinin yaklaşık 17,673.7 TJ (422.13 bin TEP) olduğu hesaplanmıştır. Her ürün için ayrı ayrı hesaplanan tarımsal artıkların ısııl değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Mardin ili ilçelerinin tarımsal artıklarının ısııl değerlerinin dağılım haritası ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Mardin ili ilçelerinin tarımsal artıklarının ısııl değer dağılım haritası

Haritalar incelendiğinde (Şekil 1 ve 2) tarımsal artık potansiyelinin ilin batı tarafında Kızıltepe ve Derik ile merkezde Artuklu ilçelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Isıl değerlerine göre Kızıltepe ilçesindeki tarımsal artıkların kaynakları olan ürünler, mısır (4,578.4 TJ), buğday (1,656.7 TJ) ve pamuk (282.71 TJ) şeklinde sıralanmıştır. Derik ilçesinde ise bu sıralama aynı şekilde mısır (3,662.7 TJ), buğday (742.8 TJ) ve pamuk (130.83 TJ) şeklindedir. Bununla birlikte, bazı ilçelerde önemli ölçüde farklı ürün artıkları görülmektedir. Üzüm bağı artıkları Midyat (734.5 TJ), Ömerli (397.8 TJ), Savur (229.5 TJ) ve Artuklu'da (207.9 TJ) önemli bir enerji potansiyeli oluşturmaktadır. Mercimek artıklarının sahip oldukları enerji potansiyeli Midyat (108.94 TJ) ve Mazıdağı'nda (89.52 TJ) dikkat çekmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Mardin ili özelinde gerçekleştirilen tarımsal üretim faaliyetlerinden kaynaklanan bitkisel atıkların biyokütle enerji potansiyeli ortaya konmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda, il genelinde önemli miktarda tarımsal artık üretildiği (968.9 kt) ve bu artıkların enerjiye dönüştürülebilir değerleri (17,673.7 TJ) belirlenmiştir. Tarla bitkilerinden elde edilen artıklar, toplam potansiyelin büyük kısmını oluştururken (%86.63), meyve bahçeleri ve bağlarda yapılan budama işlemleri de dikkate değer bir potansiyel (%13.37) oluşturmaktadır. Artık potansiyelinin ilçelere göre dağılımına bakıldığında Kızıltepe, Derik ve Artuklu ilçelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Tarımsal artık potansiyelinin en fazla olduğu ürün 567.46

bin ton ile mısır artıkları olarak belirlenmiştir. Bunu 188.06 bin ton artık potansiyeli ile buğday ve 121.62 bin ton artık miktarı ile üzüm bağı budama artıkları takip etmektedir.

Biyokütle enerji potansiyelinin değerlendirilmesi, sadece enerji üretimine değil; aynı zamanda atık yönetimi, çevre koruma, kırsal kalkınma ve istihdam artışı gibi çok boyutlu kazanımlara da katkı sunacaktır. Bu çerçevede, tarımsal artıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlayacak yatırımların desteklenmesi, Mardin'in sürdürülebilir enerji politikalarına katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Başçetinçelik, A., Öztürk, H.H., Karaca, C., Kaçira, M., Ekinci, K. Kaya, D., Baban, A., Komitti N., Barnes, I., Nieminen, M. (2006). *A Guide on Exploitation of Agricultural Residues in Turkey*. AGRO-WASTE - Exploitation of Agricultural Residues in Turkey. EU Life Program Project, Project No: LIFE03 TCY/TR/000061.
- 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. (2019). Agricultural residues potential of Hatay. *Mustafa Kemal University Journal of Agricultural Science*, 24 (Special Issue), 9-15.
- Karaca, C. (2022). Bilecik ilinde tarımsal artıklardan kaynaklı biyokütle enerjisi potansiyeli. B. Sayıncı (Editör), *Tarımsal mekanizasyon ve enerji üzerine güncel araştırmalar II* (ss. 13-21). Akademisyen Kitapevi.
- Karaca, C. (2023). Determination of energy potential of agricultural residues in Gaziantep province. *11. International Summit Scientific Research Congress Full Texts Book*, pp. 325-331, Gaziantep, Türkiye.
- Karaca, C. (2024). Energy production potential from agricultural residues in Kayseri province. *4. International World Energy Conference*, pp.1101-1107, Kayseri, Türkiye.
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2025a, Temmuz 17). *Tarım Alanları İstatistik Tablosu*. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>
- TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu). (2025b, Temmuz 17). *Bitkisel Üretim İstatistikleri: Mardin ili tüm ilçeleri*. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>

BÖLÜM 9

BİR SERA UYGULAMASINDA ŞEBEKE BAĞLANTILI VE BAĞIMSIZ HİBRİT ENERJİ SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ*

Doç. Dr. Nuri ÇAĞLAYAN

Prof. Dr. Can ERTEKİN

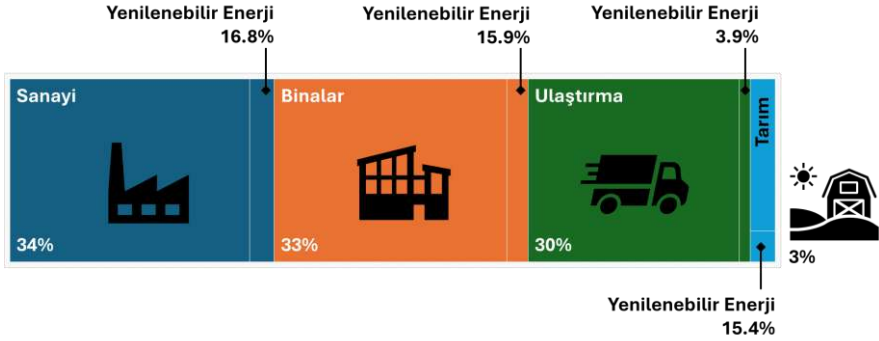
GİRİŞ

Küresel enerji talebindeki artış, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve iklim değişikliği gibi çevresel kaygılar, dünyada enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara yönelimi zorunlu hale getirmiştir. Küresel elektrik üretimi 2023 yılında 29.5 TWh seviyesine ulaşmış ve bunun yaklaşık %30.3'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir (REN21, 2024.a). 2030 yılına kadar bu oranın %45'in üzerine çıkması beklenmektedir (AA, 2024). Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi sistemleri, maliyetlerinin düşmesi ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerji üretiminde daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır.

Toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı 2021 yılında sanayi sektöründe %16.8 ile en yüksek seviyedeysen, tarım sektörünün payı %15.4 seviyesinde gerçekleşmiştir (Şekil 1). Bu farklılıklar, sektörlerin yapısal özelliklerinin yanı sıra, yenilenebilir enerji payını artırmaya yönelik bütüncül politikaların eksikliğinden kaynaklanmaktadır (REN21, 2024.b.; IEA, 2023).

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

Bu bakımdan sektörlerin elektrifikasyon düzeylerinin artırılması ve yenilenebilir enerjiye geçişlerin sağlanması için daha fazla eyleme ihtiyaç olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Sektöre göre toplam nihai enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı, 2021 (REN21, 2024.b.; IEA, 2023).

Küresel enerji üretimindeki yenilenebilir enerjiye yönelim stratejisi Türkiye’de de karşılık bulmuş ve yenilenebilir enerjiye olan talepte önemli artışlar görülmüştür. Türkiye’nin 2024 yılındaki toplam 349 TWh’lik elektrik üretiminin %42’si (137.2 TWh) yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilirken, %44’ü fosil yakıtlardan karşılanmıştır (SHURA, 2024). Buna karşılık, elektrik tüketimi 2024 yılında bir önceki yıla göre %3.8 oranında artarak 347.9 TWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik tüketiminin 2024 ve sonrası için yıllık ortalama %4.8 artış göstererek 2030 yılına kadar 450 TWh’e ulaşması öngörülmektedir.

Güneş ve rüzgâr enerjisi bakımından iyi bir konumda yer alması, Türkiye’yi yenilenebilir enerji üretiminde yüksel potansiyel sahibi

yapmaktadır. Türkiye'nin yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat (günlük ortalama 7.5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1527.46 kWh/m².yıl (ortalama 4.18 kWh/m².gün) seviyesindedir (GEPA, 2025). Öte yandan, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin toplam 47850 MW gücünde olduğu değerlendirilmektedir. Rüzgâr enerjisi potansiyelinin özellikle Türkiye'nin batı ve güney batı bölgelerinde yoğunlaştığı ve rüzgâr hızının yıllık ortalama 7.5 m/s ve üzerinde olduğu belirtilmektedir (ETKB, 2025)

Yenilenebilir enerji ve enerji verimliliğini benimseyen çiftçiler için temel faydalar arasında, enerjiye erişimin kolaylaşması ve enerji güvenilirliğinde artış, yakıt maliyetlerinde tasarruf, gıda kayıplarında azalma, mekanizasyon düzeyinde artış yer almaktadır. İlave olarak, üretim sezonlarının süresinin uzaması, yeni pazarlara erişim ile çevresel ve sağlıkla ilgili olumlu etkileri de bulunmaktadır (Puri vd., 2023; Ambuko ve Owino, 2023). Yenilenebilir enerji destekli soğutma teknolojilerini kullanan çiftçiler, gelirlerinde %40'a varan artışlar elde etmiştir (REN21, 2024.c).

Son dönemlerde bitkisel ve enerji üretiminin eş zamanlı yapıldığı ve tarım alanlarının daha etkin kullanımını sağlayan agrivoltaik uygulamalar öne çıkmaktadır. Agrivoltaik sistemler, enerji ve tarım üretimi için rekabet halindeki arazi kullanımını uzlaştırmada önemli bir fırsat sunmaktadır. Almanya, Fransa ve Japonya agrivoltaik uygulamaların öncüleridir ve diğer ülkeler de pilot projelerle bu süreci takip etmektedir (Schindele vd., 2020). Hindistan Maharaştra'daki 7 MW kapasiteli Grosolar Agrivoltaik tesisi ile Gujarat'taki 3 MW kapasiteli Solar-Agri elektrik modeli öne çıkan projeler arasındadır

(Rahman vd., 2023). Portekiz’de yapılan çalışmalarda, agrivoltaik kullanımının yalnızca tarım ya da yalnızca güneş enerjisi üretimine kıyasla daha verimli olduğunu; üretilen elektriğin hem öz tüketim hem de şebekeye satış yoluyla gelir kaynağı olarak kullanıldığını göstermektedir (Ferreira vd., 2024). 2024 yılı itibarıyla, Amerika Birleşik Devletleri’nde ekili tarım arazilerinde 73 MW agrivoltaik kapasitesi, otlatma alanlarında ise 5 GW’tan fazla kapasite kurulmuştur (NREL, 2023). Türkiye, 2023 yılında 122 kW kapasiteli ilk agrivoltaik projesini başlatmıştır (Meza, 2023). Agrivoltaik sistemlerle ilgili yapılan çalışmalar arasında fotovoltaik sistemlerin seralara entegrasyonu da bulunmaktadır (Riahi vd., 2020). Sera çatısına yerleştirilen PV panellerin ve yarı saydam PV filmlerin gölgeleme etkisi ve elektrik enerjisi üretimi (Cossu vd., 2017; Adam ve Apaydın, 2016) sera tipine, çatı şekline ve farklı montaj tiplerine (Li vd., 2017) bağlı olarak değişmektedir. Bu uygulamalar, gölge etkisine bağlı olarak yetiştirilecek ürün türünün seçiminde de (Hassanien ve Ming, 2017) etkili olmaktadır.

Kırsal kesimde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, sürdürülebilir kalkınmada kritik öneme sahiptir. Kırsal veya izole yerlerdeki haneler (Ali vd., 2021), tarım işletmeleri ve endüstriyel kompleksler, elektrik enerjisini ticari bir mikro şebekeden alabilirler (Farkhani vd., 2020). Bu sistemlerin planlanması ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde ileri düzey modelleme ve simülasyon araçları kullanılmaktadır. Güneş enerjili mini şebeke projeleri, sulama suyu pompalama, gıda kurutma, ürün öğütme ve değirmencilik ile soğuk hava depolama gibi tarımsal faaliyetler için

enerjiye erişimi artırmaktadır (ESMAP, 2023.a). Kırsaldaki tarımsal enerji talebinin büyük bölümünün gündüz saatlerinde gerçekleşmesi nedeniyle tarım arazilerine yakın alanlarda mini şebekelerin kurulması, enerji ihtiyacının karşılanmasında iyi bir çözüm olmaktadır (ESMAP, 2023.b).

1. ŞEBEKE BAĞLANTILI VE BAĞIMSIZ SİSTEMLERİN PLANLANMASI

1.1. Hibrit Sistemlerin Tasarım Parametreleri

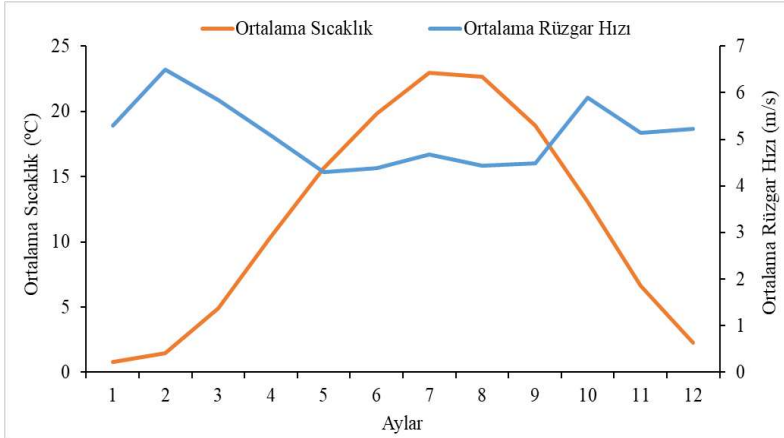
Çalışmada, Afyonkarahisar ilinde yer alan plastik bir seranın enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız hibrit sistemler planlanmış, teknik ve ekonomik analizler yapılmıştır. Bölgenin günlük güneş ışıınımı, güneşlenme süresi, ortalama sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri (Şekil 2.a ve b) NASA Yüzey Meteorolojisi ve Güneş Enerjisi veri tabanından (NASA Power, 2023) elde edilmiş ve yenilenebilir enerji potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu süreçle eşzamanlı olarak, havalandırma, serinletme, sulama-gübreleme, ısıtma sistemleri ile yönetim ofislerindeki elektriksel yük miktarları hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, elektrikli makine ve cihazların elektrik güçleri, günlük kullanım süreleri (Eşitlik 1) dikkate alınmış (Amole vd., 2023) ve aylık elektrik faturaları üzerinden kıyaslamalar yapılarak enerji tüketim profilleri oluşturulmuştur.

$$L_s = \sum_{n=1}^N Q_n P_n H_n \quad (1)$$

Burada, L_s toplam enerji yükünü (kWh), Q_n cihaz sayısını, P_n bir cihazın nominal gücünü (kW) ve H_n çalışma saatini (h) göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. Günlük güneş ışınlımı ve güneşlenme süresi (a), ortalama sıcaklık ve rüzgâr hızı (b), (NASA Power, 2023).

Önerilen şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız hibrit sistemlerin analizlerinde kullanılan bileşenler Tablo 1’de verilmiştir.

Optimizasyon çalışmaları sonucunda, yükü karşılayabilecek en uygun enerji sistemlerinin net bugünkü değerleri (NBD) ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE: Levelized Cost of Energy) gibi ekonomik göstergeler elde edilmiştir.

Tablo 1. Hibrit sitemlerdeki bileşenlerin teknik özellikleri

Sistem Bileşenleri	Teknik Özellikler
Fotovoltaik Panel (PV)	Model: LG410N2W-V5/Monokristal-si Nominal güç: 410 W Açık devre gerilimi (V_{oc}): 49.5 V Kısa devre akımı (I_{sc}): 10.55 A Modül verimi: 19.8% Kullanım ömrü: 25 yıl
Rüzgâr Türbini (RT)	Model: Eocycle EOX S-16 Nominal güç: 30 kW Rotor çapı: 15.8 m. Açma (cut-in) rüzgâr hızı: 2.75 m/s Kesme (cut-off) rüzgâr hızı: 20 m/s Rotor (hub) yüksekliği: 23.8 m. Kullanım ömrü: 30 yıl
İnverter	Model: TommaTech (Hibrit) Nominal güç: 60 kW (3 faz) AC nominal çıkış akımı: 87 A Maksimum verim: 97.60 MPPT verimliliği: >99% Kullanım ömrü: 15 yıl
Jeneratör (Jen)	Model: Generic Gen60/Dizel Nominal güç: 60 kW Yakıt eğrisi kesişimi: 2.80 L/h Minimum yüklenme oranı: 25% CO emisyonu: 17.79 g/L Kullanım ömrü: 15000 h
Batarya (B)	Model: SAFT/Kinetic 28S24M Li-on Nominal gerilim: 720 V Maksimum kapasite: 76.4 Ah Nominal kapasite: 55 kWh Gidiş-dönüş verimliliği: 97% Kullanım ömrü: 20 yıl

1.2. Hibrit Sistemlerin Matematiksel Modellemesi

Çalışmada kurulması planlanan hibrit sistemlerin teknik ve ekonomik analizler için HOMER Pro (ver.3.14.2) yazılımı kullanılmıştır. Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilen HOMER Pro, kullanıcıların güneş fotovoltaik sistemleri, rüzgâr türbinleri, aküler, dizel motorlar, temel şebeke bağlantıları ve diğer bileşenleri kullanan sonsuz sayıda sistemi modellemesine ve optimize etmesine olanak tanır. Yazılım, simülasyon bölgesi için meteorolojik verilere erişim sağlar. Uygulama, hibrit bir mikro şebekenin çalışmasını bir yıl boyunca bir dakikadan bir saate kadar zaman aralıklarıyla tekrarlayabilmektedir (HOMER 2023).

1.2.1. Fotovoltaik (PV) Modül

PV modül, yüzeyine gelen güneş ışığını doğru akıma dönüştüren yarıiletken malzemelerden üretilmektedir. Bir PV dizisinin ürettiği güç Eşitlik 2 ile hesaplanabilir (HOMER 2025):

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (2)$$

Burada, Y_{PV} PV dizisinin toplam kurulu gücünü, f_{PV} bozulma faktörünü, G_T PV yüzeyine gelen güneş ışımasını (kW/m), $G_{T,STC}$ standart test koşullarındaki ışımasını (1000 W/m²), α_p PV sıcaklık katsayısını (%/°C), T_c PV hücre sıcaklığını (°C) ve $T_{c,STC}$ standart test koşullarındaki hücre sıcaklığını (25°C) göstermektedir.

1.2.2. Rüzgâr Türbini (RT)

Rüzgâr türbini, rüzgârdaki kinetik enerjiyi alternatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Bir rüzgâr türbininin elektrik çıktısı, kule yüksekliği, türbinler, rüzgâr hızı dağılımı, dönüşüm verimliliği gibi faktörlere bağlıdır (Mulumba ve Farzaneh, 2023; Prum vd., 2024). Bir türbinden elde edilen elektrik gücü, Eşitlik 3 ve 4 kullanılarak hesaplanabilir (Das vd., 2021):

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) \leq v_{cut-in} \text{ or } v(t) \geq v_{cut-out} \\ P_r \left[\frac{v^3(t) - v_{cut-in}^3}{v_r^3 - v_{cut-in}^3} \right], & v_{cut-in} < v(t) < v_r \\ P_r, & v_r \leq v(t) \leq v_{cut-out} \end{cases} \quad (3)$$

Burada P_r , v_r , v_{cut-in} ve $v_{cut-out}$ sırasıyla türbinin nominal gücünü (kW), nominal hızını (m/s), devreye girme (açma) hızını (m/s) ve kesme hızını (m/s) belirtir. P_{wt} , türbinin rotor seviyesinde gelen rüzgârın hızına dayalı türbin gücünü temsil eder (Wang vd., 2024).

$$v(t) = v_{ref} \left[\frac{H_{WT}}{H_{ref}} \right]^\alpha \quad (4)$$

Referans yüksekliği H_{ref} ve türbinin rotor yüksekliği H_{WT} rüzgâr enerjisi hesaplamaları için çok önemlidir. Rüzgâr kesme katsayısı 0.1 ile 0.4 arasında değişen boyutsuz parametre α ile temsil edilir (Tajouo vd., 2023).

1.2.3. Dizel Jeneratör (Jen)

Jeneratör, fosil yakıtla çalışan ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrik makinesidir. Jeneratörün yakıt tüketimi Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanabilir (Oladigbolu vd., 2019).

$$Fuelc_{DG} = (a \cdot T_{DG} + b \cdot P_{DG}) \quad (5)$$

Eşitlikte, $Fuelc_{DG}$, dizel jeneratör için saatlik yakıt tüketimini (L/h), a yakıt eğrisi kesişim katsayısını (L/kWh) (0.0161 L/kWh olarak alınabilir), T_{DG} , dizel jeneratör kapasitesini (kW), b yakıt eğrisinin eğimini (L/kWh) (0.2486 L/kWh olarak alınabilir) ve P , jeneratör çıkış gücünü (kW) temsil eder.

1.2.4. Batarya Grubu (B)

Batarya grubu seri ve paralel bağlı akülerden oluşan yedekleme sistemi olarak kullanılmakta ve yük boyunca gerilim değerini sabit tutmaktadır. Depolama kapasitesi Eşitlik 6 kullanılarak hesaplanır (Oladigbolu vd., 2019):

$$C_{Batt} = \frac{E_L AD}{\eta_{inv} DOD \eta_{bat}} \quad (6)$$

Eşitlikte E_L ortalama günlük yük enerjisini (kWh/gün), AD özerklik günlerini, η_{inv} inverter verimliliğini, DOD deşarj derinliğini (%) ve η_{bat} pil depolama sisteminin verimliliğini (%) temsil eder.

1.2.5. İnverter

PV modüller ve akü gruplarından elde edilen doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesinde kullanılmaktadır. İnverter gücü Eşitlik 7 kullanılarak hesaplanabilir (Agajie vd., 2023; Lata-García vd., 2024):

$$P_{inv} = \frac{P_{peak}}{\eta_{inv}} \quad (7)$$

Eşitlikte, P_{peak} sistemin toplam tepe yük gücünü (W) ve η_{inv} invertör verimini göstermektedir.

1.2.6. Şebeke (\$) Hattı

İşletme, tarımsal sulama için belirlenen tarife göre, şebekeden elektrik satın almaktadır. Ayrıca, Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK 2024) tarafından yayınlanan Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun'a göre, yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen ihtiyaç fazlası enerji satılarak işletmeye gelir sağlanabilmektedir. Alınan ve verilen enerji bedeli mahsuplaşmaktadır. Enerji satış bedeli yılın her çeyreğinde güncellenmektedir. Modellemelerde, Türkiye'de Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) tarafından belirlenen şebeke enerji alışı ve satış bedelleri (EPIAŞ 2025) Nisan-Haziran 2025 dönemi için sırasıyla 0.096 USD/kWh, 0.076 USD/kWh olarak alınmıştır.

1.3. Planlanan Sistemlerin Ekonomik Değerlendirmelerinde Kullanılan Yöntemler

1.3.1. Net Bugünkü Değer (NBD)

Bir bileşenin net bugünkü değeri, proje ömrü boyunca sistemin kurulması ve çalıştırılması ile ilgili tüm maliyetlerin bugünkü değerinden proje ömrü boyunca elde ettiği tüm gelirlerin bugünkü değeri düşüldükten sonra kalan tutardır. NBD, Eşitlik 8 (Sarıaslan, 1990) kullanılarak hesaplanabilir:

$$NBD = \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (8)$$

Eşitlikte R_t tek bir t dönemdeki net nakit giriş-çıkışlarını, i gerçek iskonto oranını ve t zaman dilimlerinin sayısını göstermektedir. Gerçek iskonto oranı, tek seferlik maliyetler ile yıllık maliyetler arasında dönüştürme yapmak için kullanılır ve Eşitlik 9 kullanılarak hesaplanabilir (Yılmaz vd., 2010):

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (9)$$

Eşitlikte i' nominal iskonto oranı ve f beklenen enflasyon oranıdır. Türkiye için iskonto oranı 9.75 olarak alınabilir (CEIC 2023).

1.3.2. Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE)

LCOE, bir hibrit enerji sistemi için kullanım ömrü boyunca ortalama elektrik üretim maliyetinin ve belirli bir süre boyunca enerji

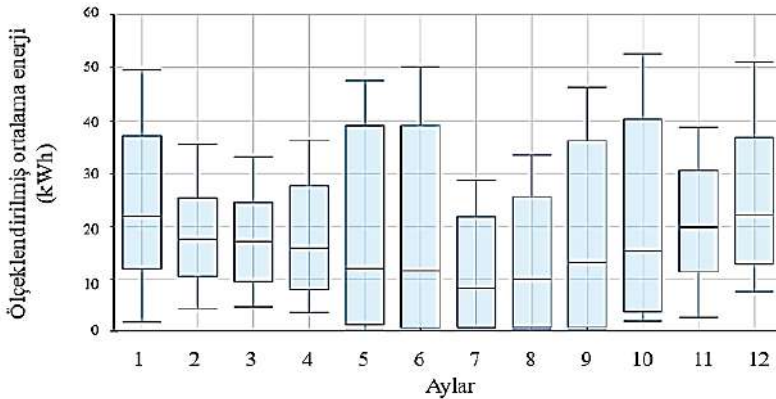
sistemi için ortalama elektrik kullanım maliyetinin ölçülmesinde kullanılır (Yokoyama vd., 2008). LCOE, Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanabilir:

$$LCOE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (10)$$

Eşitlikte, $C_{ann,tot}$ sistemin toplam yıllık maliyetini (USD/yıl), E_{served} hizmet verilen toplam yıllık yükü (kWh/yıl) ifade etmektedir.

2. SONUÇLAR

Seradaki elektriksel yük verileri, günlük elektrik tüketiminin 369.52 kWh, en yüksek güç talebinin 52.59 kW olduğunu göstermiştir. Seranın yıl içindeki elektrik yük profili (Şekil 3), günlük ve mevsimsel tüketim verilerini sunmaktadır. Böylece sera kompleksinin gerçek enerji talebiyle önerilen hibrit enerji sisteminin uyumlu olması sağlanmıştır. Bu sayede, teknik olarak uygulanabilir ve seranın enerji ihtiyaçlarını karşılayan istikrarlı bir yaklaşım benimsenmiştir.



Şekil 3. Seranın yıl içindeki elektrik yük profili

Optimizasyon sürecinde, yenilenebilir enerjinin maksimize edilmesi, LCOE, NBD ve emisyonların en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bu metodoloji, güvenilir, uygun fiyatlı ve çevre dostu enerji erişimi sağlamak için dengeli bir yaklaşım sağlamıştır. Ayrıca gelecekteki belirsizliklere uyum sağlamayı garantilemek için duyarlılık analizleri yapılmıştır. Analizlerde, farklı enflasyon oranları, yakıt fiyatları, ısıtım ve rüzgâr hızı gibi faktörler dikkate alınmış ve çeşitli senaryolar altında incelenmiştir. İlave olarak, maliyeti sürdürülebilirlikle dengelemek için çevresel etkiler (CO₂ emisyonu) de değerlendirilmiştir.

2.1. Şebekeye Bağlı Sistemlerin Analizi

Tablo 2, ekonomik, operasyonel ve çevresel performanslarını değerlendiren altı farklı hibrit enerji sistemi konfigürasyonunun kapsamlı bir karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablo 2. Şebekeye bağlı enerji sisteminin konfigürasyonu

Konfigürasyon	NBD (USD)	LCOE (USD/kWh)	İşletme maliyeti (USD/yıl)	İlk yatırım maliyeti (USD)	Yenilenebilir enerji oranı (%)	CO ₂ azaltma oranı (%)	Satın alınan enerji (kWh)	Satılan enerji (kWh)
Ş+PV	282492	0.0401	4601	164009	77.8	54.94	60771	138638
Ş+PV+RT	401065	0.0542	5127	269012	82.4	62.50	50559	152683
Ş+RT	445910	0.1260	13237	105000	17.7	16.39	112772	2152
Ş+PV+B	506112	0.0718	10954	224013	77.8	54.94	60771	138642
Ş+PV+RT+B	624729	0.0845	11499	328581	82.4	62.51	50581	152148
Ş+RT+B	785724	0.2100	20007	270455	33.5	28.48	96464	10098

2.1.1. Ekonomik Analiz

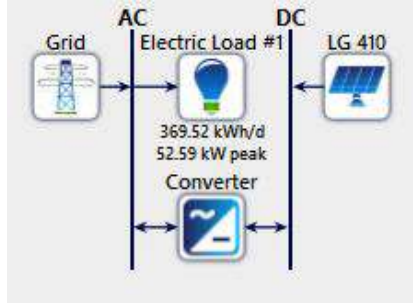
Ş+PV sistem konfigürasyonu, 282492 USD ile en düşük NPC ve 0.0401 USD/kWh düzeyindeki LCOE ile en maliyet etkin tasarım olarak öne çıkmakta; ayrıca yıllık 4601 USD gibi makul işletme giderlerine sahiptir. Buna karşılık, Ş+PV+RT+B, Ş+PV+B ve Ş+RT+B sistemleri, fotovoltaik üretim ve batarya depolamasına olan yüksek bağımlılıkları nedeniyle NPC değerleri sırasıyla 624729 USD, 506112 USD ve 785724 USD ve LCOE değerleri sırasıyla 0.0845 USD/kWh, 0.0718 USD/kWh ve 0.2100 USD/kWh ile daha yüksek maliyetlere sahiptir. PV ile entegre edilmiş Ş+PV ve Ş+PV+RT konfigürasyonları, düşük bakım ihtiyaçları nedeniyle sırasıyla 4601 USD ve 5127 USD olmak üzere en düşük işletme maliyetlerine sahiptirler. Buna karşılık, batarya ve rüzgâr türbinine dayalı sistemde Ş+RT+B, 2 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır. Bu sistem, rüzgâr türbininin yüksek bakım gereksinimi nedeniyle daha yüksek işletme giderine (20007 USD/yıl) sahiptir.

2.1.2. Çevresel Etki

Hem düşük LCOE hem de önemli çevresel faydalar sunan Ş+PV, maliyet etkinliği açısından en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Daha yüksek finansal maliyetlerine rağmen, Ş+PV+RT+B en düşük emisyon avantajı ile çevresel sürdürülebilirliği önceleyen bölgeler için daha uygun bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak, bu sistemin yüksek yatırım gereksinimleri, yaygın uygulanabilirliklerini kısıtlayabilir. Bunun yanında, benzer PV ve RT komponentlerine sahip ancak batarya bulunmadığı için daha düşük maliyetli Ş+PV+RT'de aynı emisyonu

sahip olduğundan tercih edilebilir bir konfigürasyondur. Öte yandan, rüzgâr türbini tabanlı $\text{\text{Ş}}+\text{RT}$ ve $\text{\text{Ş}}+\text{RT}+\text{B}$ sistemleri karbon salınımını anlamlı düzeyde azaltamadıkları için çağdaş enerji ihtiyaçları açısından yetersiz bir çözüm sunmaktadır. $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{RT}$ %62.50 ve $\text{\text{Ş}}+\text{PV}$ %54.94 oranında CO_2 emisyonu azaltımının yanında hem ekonomik hem de çevresel hedefleri dengeleyerek çeşitli enerji talepleri için çok yönlü çözümler sunmaktadır. $\text{\text{Ş}}+\text{PV}$ ve $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{RT}$ düşük NBD, rekabetçi LCOE ve anlamlı emisyon azaltımları ile öne çıkan hibrit seçeneklerdir ve maliyet etkinliği ile çevresel etkiyi bir arada isteyen projeler için idealdir. Öte yandan, $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{B}$ %54.94 ve $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{RT}+\text{B}$ %62.51 emisyon avantajı sunsa da, yüksek NPC ve LCOE değerleri nedeniyle kısıtlı bütçeli bölgelerdeki uygulanabilirlikleri sınırlı olabilir. Diğer alternatif sistemler, $\text{\text{Ş}}+\text{RT}$ ve $\text{\text{Ş}}+\text{RT}+\text{B}$, yüksek emisyon ve işletme maliyetleri nedeniyle tüm değerlendirme kriterlerinde zayıf performans göstermekte olup, geleceğin enerji ihtiyaçları için uygun görülmemektedir.

Son olarak, $\text{\text{Ş}}+\text{PV}$ maliyet, güvenilirlik ve orta düzeyde emisyon azaltımı açısından genel olarak en iyisidir. Bu sistem dışında $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{RT}$ konfigürasyonu da kabul edilebilir. $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{B}$ ve $\text{\text{Ş}}+\text{PV}+\text{RT}+\text{B}$ düşük emisyon açısından idealdir, ancak daha yüksek bir bütçe gerektirmektedir. $\text{\text{Ş}}+\text{RT}$ ve $\text{\text{Ş}}+\text{RT}+\text{B}$ çevresel fayda açısından sırasıyla %16.39 ve %28.48 ile en kötü olanlardır. Yüksek maliyetler, emisyonlar ve verimsizlik nedeniyle $\text{\text{Ş}}+\text{RT}$ ve $\text{\text{Ş}}+\text{RT}+\text{B}$ sistemlerinden kaçınılmalıdır. Şekil 4 şebekeye bağlı enerji sistemi konfigürasyonunu göstermektedir. Bu sistem, 52.59 kW tepe yük ile 369.52 kWh/gün enerji talebini karşılamak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 4. Şebeke bağlantılı fotovoltaik (Ş+PV) sistemi.

Ş+PV sisteminde, ana güç kaynağı şebekedir ve PV ek enerji sağlamakta, fazla güneş enerjisi şebekeye verilmektedir. Düşük bakım ihtiyaçları nedeniyle en düşük işletme maliyetlerine sahip olması yanında sistemin ömrü panellerin ömrü kadardır. Zorluklar arasında sistem performansının günlük ışınlam ve güneşlenme süresine bağımlı olması yer almaktadır. Tablo 3'te, önerilen Ş+PV hibrit enerji sisteminin ömür boyu maliyetleri sermaye, yedek parça, işletme ve bakım, yakıt ve hurda değerleri dahil olmak üzere ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

Tablo 3. Şebekeye bağlı (Ş+PV) sistem bileşenlerinin maliyet değerlendirmesi.

Bileşen	İlk yatırım maliyeti (USD)	Değiştirme maliyeti (USD)	Bakım/onarım maliyeti (USD)	Hurda değeri (USD)	Toplam (USD)
Şebeke (\$)	0.00	0.00	-121107.18	0.00	-121107.18
Panel (PV)	153414.63	0.00	232414.04	0.00	385828.68
İnverter	10594.35	9672.50	802.49	-3298.37	17770.97
Sistem	164008.98	9672.50	112109.35	-3298.37	282492.47

PV panel sistemi, 153414.63 USD ile en pahalı başlangıç yatırımı gerektiren bileşendir. Panellerin 25 yıllık ömrü boyunca toplam

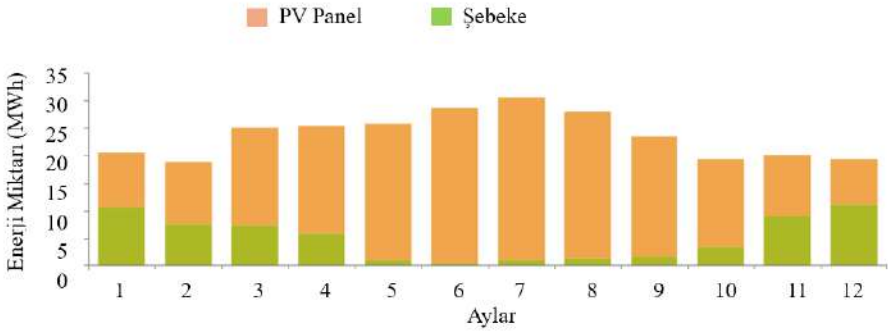
maliyeti 385828.68 USD'dır. İnverter ise 10594.35 USD ile en ekonomik bileşendir. Toplam sistem maliyeti 282492.47 USD olup, bu değerin büyük kısmı onarım ve bakım (112109.35 USD) giderlerinden oluşmaktadır. Panellerin ve sistemin ömrü aynı olduğundan panellerin hurda değeri, sistemin toplam hurda değerine dahil edilmemiştir. Bu nedenle sistemin 3298.37 USD'lık hurda değeri, yalnız konverter hurda değerinden oluşmaktadır.

Sera kompleksinin yıllık enerji ihtiyacı 134875 kWh olup, günlük ortalama tüketim 369.52 kWh'tir. Önerilen Ş+PV sistemi bu ihtiyacı rahatlıkla karşılamakta ve fazlası şebekeye satılmaktadır. PV panellerden yıllık 224311 kWh enerji üretilmektedir. Üretilen yıllık 138638 kWh fazla enerji (Tablo 4) şebekeye satılmaktadır (Şekil 5).

Tablo 4. Şebekeye verilen ve alınan enerji miktarı

Aylar	Şebekeden alınan enerji (kWh)	Şebekeye verilen enerji (kWh)	Şebekeye satılan enerji (USD)
Ocak	10612	3828	727,78
Şubat	7469	6528	220,85
Mart	7430	11538	-163,69
Nisan	5841	12886	-418,62
Mayıs	1022	15568	-1085,08
Haziran	590	18753	-1368,51
Temmuz	988	22821	-1639,57
Ağustos	1299	19022	-1320,93
Eylül	1665	12860	-817,55
Ekim	3511	7095	-202,12
Kasım	9176	5191	486,4
Aralık	11169	2548	878,58
Yıllık	60771	138638	-4702,46

Buna karşılık şebekeden yıllık 60771 kWh enerji satın alınmaktadır. Buna göre, sera kompleksinin enerji ihtiyacının %78.7'si PV sistemlerinden, %21.3'ü ise şebekeden karşılanmaktadır. Yıllık CO₂ emisyonu 38408 kg olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Şebekeden alınan enerjiye karşılık PV tarafından üretilen ve şebekeye satılan enerji miktarları

2.1.3.Şebekeye Bağlı Sistem İçin Duyarlılık Analizi

Şebeke bağlantılı önerilen Ş+PV sistem için yapılan duyarlılık analizinde, 5 farklı parametreye göre, en düşük, ortalama ve maksimum olmak üzere üç farklı senaryo ele alınmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Ş+PV sistemi için duyarlılık analizi parametreleri

Parametre	En düşük	Ortalama	En yüksek
Ortalama güneş ışınımı (kWh/m ² .gün)	2.0	4.5	7.0
Ortalama sıcaklık (°C)	1.0	11.5	25.0
Beklenen enflasyon oranı (%)	5	10	30
Şebekeden enerji alış fiyatı (USD/kWh)	0.12	0.14	0.16
Şebekeye enerji satış fiyatı (USD/kWh)	0.10	0.14	0.18

En düşük, ortalama ve en yüksek verilere göre yatırımın geri ödeme süreleri sırasıyla 12, 2.8 ve 25 yıl olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, şebeke bağlantılı önerilen sistemin, parametrelerin ortalama koşullarında dönüş süresinin en düşük olacağını göstermektedir.

2.2. Şebekeden Bağımsız Sistemler

2.2.1. Ekonomik Analiz

En ekonomik sistemin Jen+PV+B maliyeti (1.19 milyon USD) ile en pahalı sistemin RT+B maliyeti (4.52 milyon USD) arasında neredeyse üç kata yakın bir fark bulunmaktadır. RT+B sisteminin diğerlerine göre çok yüksek maliyetli olması, 12 adet rüzgâr türbinine bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Jeneratör tabanlı sistemler olan Jen+PV ve Jen+PV+RT (sırasıyla 1.85 ve 1.92 milyon USD), orta maliyet aralığında yer almaktadır, ancak çevresel faydaları oldukça sınırlı kalmaktadır. Enerji üretim maliyeti açısından değerlendirildiğinde, en düşük LCOE değerine sahip sistem Jen+PV+B, 0.342 USD/kWh ile öne çıkmaktadır. Buna karşın, sıfır emisyon hedefiyle tasarlanmış, ancak yüksek maliyet gerektiren RT+B, 1.370 USD/kWh ile en yüksek LCOE değerine sahiptir.

Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik ile finansal gereksinimler arasındaki kaçınılmaz dengeyi yansıtmaktadır (Tablo 6). Öte yandan, PV ile entegre edilmiş konfigürasyonlar olan Jen+PV+B ve Jen+PV+RT+B, düşük yakıt tüketimi (sırasıyla 20363 L/yıl ve 17574 L/yıl) ve düşük bakım ihtiyacı (sırasıyla 39321 USD ve 37155 USD) nedeniyle en düşük işletme maliyetlerine sahiptir. Buna karşılık, rüzgâr türbini ve bataryalı RT+B sistemi, 12 türbinin yüksek bakım gereksinimi nedeniyle en yüksek işletme giderine (100917 USD) sahiptir.

Tablo 6. Şebeke bağlantısız sistem konfigürasyonları

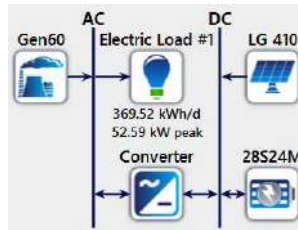
Sistem konfigürasyonu	NBD (USD)	LCOE (USD/kWh)	İşletme maliyeti (USD/yıl)	İlk yatırım maliyeti (USD)	Yenilenebilir enerji oranı (%)	Dizel yakıt tüketimi (L/yıl)	CO ₂ azaltım oranı (%)
Jen+PV+B	1.19M	0.342	39 321	173 909	56.8	20 363	64.58
Jen+PV+RT+B	1.22M	0.350	37 155	258 453	63.1	17 574	69.43
Jen+RT+B	1.65M	0.476	53 245	283 459	32.4	31 449	45.30
Jen+PV	1.85M	0.531	69 871	46 672	0	52 209	9.19
Jen+PV+RT	1.92M	0.553	69 032	143 441	0	49 886	13.23
Jen+RT	1.96M	0.566	71 749	116 500	0	53 402	7.12
PV+RT+B	2.54M	0.759	58 950	1.02M	100	0	100
PV+B	2.80M	0.837	74 327	883 702	100	0	100
RT+B	4.52M	1.370	100 917	1.93M	100	0	100

2.2.2. Çevresel Etki

Hem düşük LCOE hem de önemli çevresel faydalar sunan Jen+PV+B ve Jen+PV+RT+B, maliyet etkinliği açısından en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Daha yüksek finansal maliyetlerine rağmen, PV+RT+B, PV+B ve RT+B sıfır emisyon avantajları ile çevresel sürdürülebilirliği önceleyen bölgeler için daha uygun bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak, bu sistemlerin yüksek yatırım gereksinimleri, yaygın uygulanabilirliklerini kısıtlayabilir. Öte yandan, jeneratöre dayalı (Jen), (Jen+PV), (Jen+RT) ve (Jen+PV+RT) karbon salınımını anlamlı düzeyde azaltamadıkları için çağdaş enerji ihtiyaçları açısından yetersiz kalmaktadır. Jen+PV+B, %64.58 oranında CO₂ emisyonu azaltımı sağlayarak dengeli bir seçenek sunmaktadır. Benzer şekilde, Jen+PV+RT+B %69.43 ve Jen+RT+B %45.30 ile marjinal olarak daha düşük ancak benzer çevresel faydalar sağlamaktadır. Bu hibrit sistemler hem ekonomik hem de çevresel hedefleri dengeleyerek çeşitli enerji talepleri için çok yönlü çözümler sunmaktadır. Jen+PV+B ve Jen+PV+RT+B, düşük NBD, rekabetçi LCOE ve anlamlı emisyon azaltımları ile öne çıkan hibrit seçeneklerdir.

ve maliyet etkinliği ile çevresel etkiyi bir arada arayan projeler için idealdir. Öte yandan, PV+RT+B, PV+B ve RT+B sıfır emisyon avantajı sunsa da yüksek NBD ve LCOE değeri nedeniyle bütçe kısıtlı bölgelerde uygulanabilirlikleri sınırlı olabilir. Jeneratör tabanlı Jen+PV, Jen+PV+RT, Jen ve Jen+RT sistemler, yüksek emisyon ve işletme maliyetleri nedeniyle tüm değerlendirme kriterlerinde zayıf performans göstermekte olup, geleceğin enerji ihtiyaçları için uygun görülmemektedir.

Sonuç olarak, Jen+PV+B düşük maliyet, güvenilirlik ve emisyon azaltımı açısından önerilebilecek en iyi sistemdir. Bunun dışında ikinci Jen+PV+RT+B ve üçüncü Jen+RT+B konfigürasyonları kabul edilebilir. Sistem PV+RT+B, PV+B ve RT+B karbon nötrlüğü için idealdir ancak daha yüksek bütçe gerektirmektedirler. Yüksek maliyetler, emisyonlar ve verimsizlik nedeniyle Jen+PV, Jen+PV+RT, Jen ve Jen+RT sistemlerinden kaçınılmalıdır. Şekil 6 sera için enerji sistemi konfigürasyonunu göstermektedir. Bu sistem, 52.59 kW tepe yük ile 369.52 kWh/gün enerji talebini karşılamak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 6. Önerilen şebeke bağlantısız Jen+PV+B sistemi

Jen+PV+B sisteminde jeneratör ana güç kaynağıdır ve solar PV ek enerji sağlar. Fazla güneş enerjisi aküde depolanır ve bir dönüştürücü ile dizel kullanımını azaltılır. Zorluklar arasında ağır dizel bağımlılığı, daha yüksek maliyetler ve sınırlı pil depolaması yer alır. Jen+PV+B konfigürasyonu, 1.19 milyon USD ile en düşük NBD ve 0.342 USD/kWh düzeyindeki LCOE ile en etkin maliyetli tasarım olarak öne çıkmakta; ayrıca yıllık 39321 USD gibi makul işletme giderlerine sahiptir. Buna karşılık, PV+RT+B, PV+B sistemi ile RT+B sistemleri, fotovoltaiik üretim ve batarya depolamasına olan yüksek bağımlılıkları nedeniyle sırasıyla 2.54 milyon USD, 2.80 milyon USD ve 4.52 milyon USD NPC ve 0.759 USD/kWh, 0.836 USD/kWh ve 1.370 USD/kWh LCOE ile daha yüksek maliyetlere sahiptir. Yüksek başlangıç maliyetleri yanında, RT+B sisteminde 12 adet rüzgâr türbininin toplam bakım gereksiniminin yüksek olması nedeniyle en yüksek işletme maliyetlerini (100917 USD/yıl) sunmaktadır.

Jeneratör tabanlı sistemler, yüksek yakıt tüketimi ve sık bakım gereksinimi nedeniyle önemli ölçüde yüksek işletme maliyetlerine yol açmaktadır. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, PV+RT+B, PV+B ve RT+B sistemleri sıfır CO₂ emisyonu ile en iyi performansı göstermekte olup, yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen ancak sürdürülebilirlik odaklı projeler için düşünülebilir. Buna karşın, yalnızca jeneratöre dayalı sistem yıllık 150377 kg CO₂ emisyonu ile en yüksek çevresel etkiye sahiptir ve bu nedenle en az çevre dostu alternatif olarak değerlendirilmektedir. Jen+PV+RT+B sistemi %69.43 ve Jen+PV+B %64.58 oranında CO₂ emisyon azaltımı sağlamaktadır; elde edilen sonuçlar Woldegiyorgis vd., (2025), Samatar vd., (2024) ve Eze vd.,

(2024)'nın çalışmalarındaki bulgularla da uyumludur. Sonuçlar, maliyet etkinliği, güvenilirlik ve çevresel faydalar arasında dengeli bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Tablo 7'de, önerilen hibrit enerji sisteminin ömür boyu maliyetleri sermaye, yedek parça, işletme ve bakım, yakıt ve hurda değerleri dahil olmak üzere ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

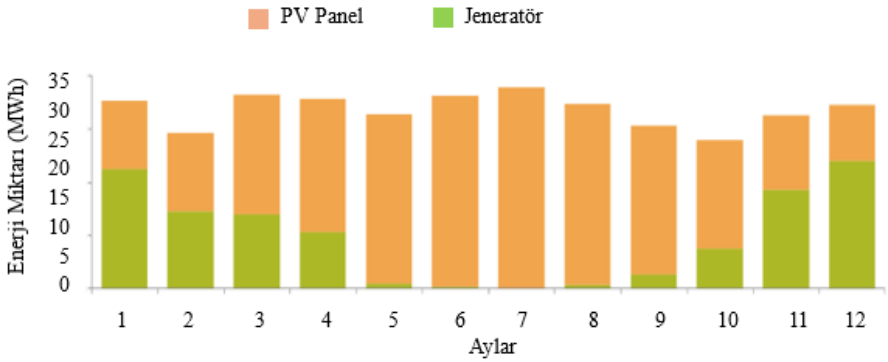
Tablo 7. Şebeke bağlantısız Jen+PV+B hibrit sistem için maliyetler

Sistem Bileşenleri	İlk yatırım maliyeti (USD)	Değiştirme maliyeti (USD)	Bakım/onarım maliyeti (USD)	Yakıt gideri (USD)	Hurda değeri (USD)	Toplam (USD)
Jeneratör (Jen)	11500.00	47430.39	2592.14	629308.62	3976.55	686854.60
Panel (PV)	97697.78	0.00	148006.33	0.00	0.00	245704.11
Batarya (B)	60000.00	37121.02	154523.93	0.00	5525.37	246119.59
İnverter	4710.96	4301.04	356.84	0.00	1466.68	7902.16
Sistem	173908.74	88852.46	305479.24	629308.62	10968.59	1186580.46

Jeneratör (Jen), 686854.60 USD ile sistemin en pahalı bileşeni olup bu maliyetin büyük kısmı yüksek yakıt tüketimi (629308.62 USD) ve yedek parça giderlerinden (47430.39 USD) kaynaklanmaktadır. Hurda değeri toplam maliyeti 3976.55 USD azaltmaktadır. Panel (PV) sistemi, 97697.78 USD ile en pahalı başlangıç yatırımı gerektiren bileşendir. Panellerin 25 yıllık ömrü boyunca toplam maliyeti 245704.11 USD'dır. Li-ion batarya 60000 USD'lik yüksek ilk maliyet ve 37121.02 USD'lik en yüksek ikinci yedek parça gideriyle toplamda 246119.59 USD'a ulaşmakta; yakıt maliyeti olmamasına rağmen sık yenileme ihtiyacı ve 5525.37 USD'lık hurda değerine sahiptir. İnverter ise 7902.16 USD ile en ekonomik bileşendir. Toplam sistem maliyeti 1186580.46 USD olup, bu değer büyük kısmı jeneratör yakıtı (629308.62 USD) ile onarım ve bakım (305479.24 USD) giderlerinden

oluşmaktadır. Dizel, sistem güvenilirliğini artırsa da işletme maliyetlerini yükseltmektedir; buna karşılık güneş enerjisi düşük işletme maliyeti sunarken daha yüksek ilk yatırım gerektirmektedir. 10968.59 USD'lık hurda değeri, uzun vadeli finansal zorlukları yansıtmaktadır. Maliyet etkinliği sağlamak için yenilenebilir enerji yatırımları ile konvansiyonel sistem harcamaları arasında denge kurulmalıdır. Sera kompleksinin yıllık enerji ihtiyacı 134875 kWh olup, günlük ortalama tüketim 369.52 kWh'tir. Önerilen hibrit enerji sistemleri bu ihtiyacı büyük oranda karşılamakta; Jen+PV+B, Jen+PV+RT+B ve Jen+RT+B sistemlerinin yıllık üretimleri sırasıyla 201092 kWh, 187 092 kWh ve 139723 kWh olarak bulunmuştur.

Önerilen sistem Jen+PV+B tarafından üretilen yıllık toplam 201092 kWh enerjinin, %71.1'ini PV, %28.9'unu ise jeneratör (Şekil 7) üretmektedir. Ayrıca jeneratörün en yoğun çalıştığı aylar güneşlenmenin azaldığı veya yetersiz kaldığı kış aylarında görülmektedir. Jeneratörün en az çalıştığı dönem Mayıs sonundan Ağustos ortasına kadar olan zamanı kapsamaktadır. Bu aralıkta yakıt tüketiminin ortalama 2 - 4 L/h arasında ve üretilen elektriksel gücün ortalama 17.3 kW olarak gerçekleşeceği öngörülmektedir. Ayrıca, jeneratörün yılda 3355 saat çalışacağı ve 20362 L yakıt tüketeceği tahmin edilmektedir.



Şekil 7. PV ve jeneratör tarafından karşılanan enerji üretimi

Çoğu sistem, sıfır karşılanmamış yük düzeyiyle birlikte 2309 ila 441390 kWh arasında fazla enerji üretmekte ve böylece yeterli depolama kapasitesi sağlamaktadır. En düşük üretim fazlası dahi sistemi besleyebilecek güvenilir seviyededir. Ancak, üç sistem PW+RT+B, PV+B ve RT+B sırasıyla, yıllık 4922 kWh, 5007 kWh ve 6179 kWh düzeyinde küçük karşılanmamış yük göstermektedir; bu durum, üretim yetersizliğinden ziyade geçici depolama veya dağıtım verimsizliklerinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak, hibrit sistemler sadece seranın enerji ihtiyaçlarını karşılamakla kalmayıp önemli miktarda fazla üretimle güvenilir depolama ve sürekli elektrifikasyonu da desteklemektedir.

PV, RT, dizel jeneratör ve batarya depolama kombinasyonuna dayalı hibrit sistemler, ekonomik ve çevresel açıdan dengeli çözümler sunmaktadır. %32.4 ila %63.1 arasında değişen yenilenebilir enerji payı, 0.342 USD/kWh ila 0.476 USD/kWh arasında değişen LCOE ve 1.19 milyon USD ila 1.22 milyon USD arasındaki NBD ile bu sistemler en maliyet etkin çözümü temsil etmektedir. Dizel tabanlı sistemlere

göre daha yüksek başlangıç maliyetlerine (173909 USD ila 283459 USD) sahip olsalar da hibrit sistemler daha düşük yıllık işletme maliyetleri (37155 USD ila 53245 USD) ve azaltılmış CO₂ emisyonları (45966 ila 82256 kg/yıl) ile öne çıkmaktadır. Bu avantajlar, hibrit sistemleri sadece ekonomik olarak uygulanabilir değil, aynı zamanda çevresel açıdan da sürdürülebilir kılmakta; böylece şebeke dışı bölgelerde yeşil enerji ihtiyacını karşılayan ideal bir seçenek haline gelmektedir. Bu bulgular Woldegiyorgis vd., (2025) ve Kumar vd., (2025)'ın çalışmalarıyla da uyumludur.

Buna karşılık, yalnızca dizel tabanlı sistemler daha düşük ilk yatırımlar gerektirmekte (11500 USD ila 283459 USD), ancak uzun vadeli sorunlara yol açmaktadır: daha yüksek LCOE (0.476 USD/kWh ila 0.566 USD/kWh), daha yüksek NBD (1.85 milyon USD ila 1.96 milyon USD), yüksek işletme giderleri (53245 USD/yıl ila 74252 USD/yıl) ve CO₂ emisyonları (136556 ila 150377 kg/yıl). Tamamen yenilenebilir sistemler ise emisyonlu olmalarına rağmen yüksek başlangıç maliyetleri (883702 USD ila 1.93 milyon USD) ve yüksek NBD değerleri (2.80 milyon USD ila 4.52 milyon USD) ile dikkat çekmektedir; yıllık işletme maliyetleri düşük (74327 USD/yıl ila 100917 USD/yıl) olsa da uygulanabilirlikleri maliyet faktörlerine bağlıdır.

Bu tür sistemlerin fizibilitesi; bileşen maliyetleri ve iskonto oranları gibi faktörlerden etkilenmektedir. Finansman maliyetlerinde sağlanacak azalmalar hem hibrit hem de yenilenebilir sistemlerin uygulanabilirliğini büyük ölçüde artırabilir.

2.2.3. Şebeke Bağlantısız Sistem İçin Duyarlılık Analizi

Şebeke bağlantısız önerilen Jen+PV+B sistem için yapılan duyarlılık analizinde 4 farklı parametreye göre en düşük, ortalama ve maksimum olmak üzere üç farklı senaryo ele alınmıştır (Tablo 8).

Tablo 8. Jen+PV+B sistemi için duyarlılık analizi parametreleri

Parametreler	En düşük	Ortalama	En yüksek
Ortalama güneş ışınımı (kWh/m ² .gün)	2.0	4.5	7.0
Ortalama sıcaklık (°C)	1.0	11.5	25.0
Dizel yakıt fiyatı (USD/L)	1.2	1.5	1.8
Beklenen enflasyon oranı (%)	5	10	30

Yapılan analizlerin sonucunda, en düşük, ortalama ve en yüksek verilere göre yatırımın geri dönüş süreleri sırasıyla 3.9, 2.4 ve 5.1 yıl olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, şebeke bağlantısız önerilen sistemin parametrelerin ortalama koşullarında dönüş süresinin en düşük olacağını göstermektedir.

3. TARTIŞMA

Maliyetlerin gün geçtikçe daha çok önem kazandığı günümüz ekonomik şartlarında, enerji maliyetlerinin sürekli artması, diğer sektörlerde olduğu gibi tarım işletmelerinde de tasarruf yapmaya ve ihtiyacın karşılanmasına yönelik çözüm yolları bulmaya zorlamaktadır. Güneş, rüzgâr ve gerektiğinde destekleyici olarak kullanılan dizel jeneratörlerden oluşan hibrit enerji sistemleri, seraların enerji ihtiyacını karşılamada teknik ve ekonomik olarak sürdürülebilir seçenekler sunmaktadır. Tarım işletmelerinin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılama konusundaki beklentiler; enerjilerini güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmek, hatta üretecekleri fazla enerjiyi

şebekeye satmaları yönündedir. Böylece, potansiyel yeşil elektriğin en yüksek elektrik talep dönemlerinde elektrik şebekesine satılarak, çevre kirletici maddelerin azaltılmasının yanı sıra, ek ekonomik faydalar da sağlanabilir.

Hibrit bir sistemde, elektrik üretimi için yenilenebilir kaynaklar fosil yakıtlarla birleştirilir. Hibrit sistemlerin ana amacı, fosil yakıt tüketimini azaltmak ve son kullanıcılara uygun maliyetli en yüksek avantajı sağlamaktır. Bu çalışmada, sera gibi yüksek enerji ihtiyacı olan tesisler için şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız yenilenebilir enerji sistemlerinin teknik, ekonomik ve çevresel performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiş ve en uygun hibrit sistem konfigürasyonları belirlemiştir. Maliyet etkinliği, çevresel fayda ve operasyonel güvenilirlik dengesi dikkate alındığında, şebekeye bağlı sistemler için Ş+PV konfigürasyonu en uygun seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sistem, düşük maliyet, emisyon azaltımı ve sera tesisinin enerji ihtiyacını karşılama kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Şebekeden bağımsız sistemlerde ise Jen+PV+B konfigürasyonu benzer bir dengeli performans sunarak maliyet etkinliği ve emisyon azaltımı açısından ideal bir çözüm sunmaktadır.

Çalışma, her iki sistem tipi için de çevresel hedefler ile finansal gereksinimler arasındaki kaçınılmaz dengeyi vurgulamaktadır. Özellikle batarya ve rüzgâr türbini entegrasyonu, karbon nötr hedefleri için cazip olsa da mevcut yüksek maliyetleri yaygın uygulanabilirliklerini kısıtlayabilir. Jeneratör tabanlı sistemler ise yüksek emisyon ve işletme maliyetleri nedeniyle genellikle kaçınılması gereken seçeneklerdir. Gelecekteki araştırmalar, batarya depolama ve

rüzgâr enerjisi teknolojilerinin maliyetlerini düşürmeye odaklanarak bu sistemlerin daha geniş ölçekte benimsenmesini sağlayabilir.

KAYNAKÇA

AA. (2024). Anadolu Ajansı, Ekonomi. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/dunya-elektrik-uretiminde-yenilenebilirin-payi-ilk-kez-yuzde-30u-asti-turkiyede-yuzde-42ye-ulasti/3213124> (Erişim: 04.05.2025).

Adam, D., Apaydin, G. (2016). Grid Connected Solar Photovoltaic System as a Tool for Greenhouse Gas Emission Reduction in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1086-1091.

Agajie, T. F., Fopah-Lele, A., Ali, A., Amoussou, I., Khan, B., Elsis, M., ... & Tanyi, E. (2023). Optimal sizing and power system control of hybrid solar PV-biogas generator with energy storage system power plant. *Sustainability*, 15(7), 5739.

Ali, S., Zheng, Z., Aillerie, M., Sawicki, J.-P., Péra, M.-C. & Hissel, D. A. (2021). Review of DC Microgrid Energy Management Systems Dedicated to Residential Applications. *Energies* 14, 4308.

Ambuko, J., Owino, W. (2023). Toward Sustainable Transformation Through Postharvest Management: Lessons from Kenya's Mango Value Chain, in International Food Policy Research Institute, *Food Systems Transformation in Kenya: Lessons from the Past and Policy Options for the Future*, 2023, 433-68, https://doi.org/10.2499/9780896294561_17

Amole, A. O., Oladipo, S., Olabode, O. E., Makinde, K. A., & Gbadega, P. A. (2023). Analysis of Grid/Solar Photovoltaic Power Generation for Improved Village Energy Supply: A Case of Ikose in Oyo State Nigeria. *Renewable Energy Focus*, 44, 186–211. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.01.002>

CEIC (2023). Turkey Central Bank Discount Rate. View Turkey's Turkey Central Bank Discount Rate from 1970 to 2023 in the chart. <https://www.ceicdata.com/en/turkey/saving-discount-rate-and-interbank-rate> (Erişim: 19.05.2025).

Cossu, M., Yano, A., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P.A., Sirigu, A., Chessa, F. & Pazzona, A. (2017). Effects of the Photovoltaic Roofs on the Greenhouse Microclimate. *Acta Hort.* 1170, 461-468. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.57>

Das, B. K., Alotaibi, M. A., Das, P., Islam, M. S., Das, S. K., & Hossain, M. A. (2021). Feasibility and techno-economic analysis of stand-alone and grid-connected PV/Wind/Diesel/Batt hybrid energy system: A case study. *Energy Strategy Reviews*, 37, 100673.

EPDK (2024). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/23-2-3/mevzuat> (Erişim: 12.05.2025).

EPİAŞ (2025). Elektrik Piyasası. <https://www.epias.com.tr/tum-duyurular/01-07-2021-tarihinden-31-12-2030-tarihine-kadar-isletmeye-girecek-yek-belgeli-yenilenebilir-enerji-kaynaklarina-dayali-elektrik-uretim-tesisleri-icin-uygulanacak-fiyatlar-hk-22/> (Erişim: 08.06.2025).

ESMAP (2023.a). Energy Sector Management Assistance Program. Energy Storage for Mini Grids: Status and Projections of Battery Deployment. https://www.esmap.org/Energy_Storage_for_Mini_Grids (Erişim: 08.06.2025).

ESMAP (2023.b). Energy Sector Management Assistance Program. Accelerating the Productive Use of Electricity: Enabling Energy Access to Power Rural Economic Growth. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099092023192023389/P1751521d3f58f6f1307c1499619e141b8baef6de8dd> (Erişim: 11.06.2025).

ETKB (2025). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Rüzgar Enerji Potansiyel Haritası-REPA. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> (Erişim: 04.05.2025)

Eze, V. H. U., Mwenyi, J. S., Ukagwu, K. J., Eze, M. C., Eze, C. E., & Okafor, W. O. (2024). Design analysis of a sustainable techno-economic hybrid renewable energy system: Application of solar and wind in Sigulu Island, Uganda. *Scientific African*, 26, e02454.

Farkhani, J.S., Zareein, M., Najafi, A., Melicio, R. & Rodrigues, E.M.G. (2020). The Power System and Microgrid Protection—A Review. *Appl. Sci.* 10, 8271.

Ferreira, R. F., Lameirinhas, R. A. M., Bernardo, C. P. C. V., Torres, J. P. N., & Santos, M. (2024). Agri-PV in Portugal: How to combine agriculture and photovoltaic production. *Energy for Sustainable Development*, 79, 101408.

GEPA (2025). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası. <https://gepa.enerji.gov.tr/> (Erişim: 05.05.2025).

Hassanien, R. H. E. & Ming, L. (2017). Influences of Greenhouse-integrated Semi-transparent Photovoltaics on Microclimate and Lettuce Growth. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(6), 11-22.

HOMER (2025). HOMER Pro Manual. <https://support.ul-renewables.com/homer-manuals-pro/index.html> (Erişim: 20.06.2025).

IEA (2023). World Energy Balances. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances> (Erişim: 09.04.2025).

Kumar, P. H., Alluraiah, N. C., Gopi, P., Bajaj, M., Kumar, S., Kalyan, C. N. S., & Blazek, V. (2025). Techno-economic optimization and

sensitivity analysis of off-grid hybrid renewable energy systems: A case study for sustainable energy solutions in rural India. *Results in Engineering*, 25, 103674.

Lata-García, J., Zamora Cedeño, N., Ampuño, G., Jurado, F., Swarupa, M. L., & Maliza, W. (2024). Optimization and evaluation of a stand-alone hybrid system consisting of solar panels, biomass, diesel generator, and battery bank for rural communities. *Sustainability*, 16(20), 9012.

Li, C., Wang, H., Miao, H. & Ye, B. (2017). The Economic and Social Performance of Integrated Photovoltaic and Agricultural Greenhouses Systems: Case Study in China. *Applied Energy*, 190, 204-212.

Meza E. (2023). Turkey Launches Agrivoltaics Research Project, PV Magazine International, 27 December 2023, <https://www.pv-magazine.com/2023/12/27/turkey-launches-agrivoltaics-research-project> (Erişim: 17.03.2025).

Mulumba, A. N., & Farzaneh, H. (2023). Techno-economic analysis and dynamic power simulation of a hybrid solar-wind-battery-flywheel system for off-grid power supply in remote areas in Kenya. *Energy Conversion and Management: X*, 18, 100381.

NASA Power (2025). Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (Erişim: 06.02.2025).

NREL (2023). Agrivoltaics. Solar Market Research and Analysis. <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/agrivoltaics.html> (Erişim: 13.03.2025)

Oladigbolu, J. O., Ramli, M. A., & Al-Turki, Y. A. (2019). Techno-economic and sensitivity analyses for an optimal hybrid power system which is adaptable and effective for rural electrification: A case study of Nigeria. *Sustainability*, 11(18), 4959.

Prum, M., Goh, H. H., Zhang, D., Dai, W., Kurniawan, T. A., & Goh, K. C. (2024). Optimizing hybrid energy systems for remote communities in Asia's least developed countries. *Heliyon*, 10(8).

Puri, M., Kojakovic, A., Rincon, L., Gallego, J., Vaskalis, I. & Maltoglou, I. 2023. "The Small-Scale Fisheries and Energy Nexus: Opportunities for Renewable Energy Interventions", Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023, <https://doi.org/10.4060/cc4903en>

Rahman, A., Sharma, A., Postel, F., Goel, S., Kumar, K., & Laan, T. (2023). *Agrivoltaics in India: Challenges and opportunities for scale-up*. International Institute for Sustainable Development (IISD). <http://www.jstor.org/stable/resrep49783>

REN21 (2024.a). Renewables 2024 Global Status Report Collection. Renewables 2024 Global Status Report. A Comprehensive Annual Overview of The State of Renewable Energy. https://www.ren21.net/gsr-2024/#target_8 (Erişim: 04.05.2025).

REN21 (2024.b). Renewables in Energy Demand: Global Trends. Market Developments and Investment Trends. https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_demand (Erişim: 04.05.2025).

REN21 (2024.c). Renewables in Agriculture. Renewables 2024 Global Status Report Collection. https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_demand/04_renewables_in_agriculture/ (Erişim: 04.05.2025).

Riahi, J., Vergura, S., Mezghani, D. & Mami, A. (2020). Intelligent Control of the Microclimate of an Agricultural Greenhouse Powered by a Supporting PV System, *Applied Sciences*, 10(4), 1350.

Samatar, A. M., Mekhilef, S., Mokhlis, H., Kermadi, M., & Alshammari, O. (2024). Performance analysis of hybrid off-grid renewable energy systems for sustainable rural electrification. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100780.

Sariaslan H (1990) Yatırım Projelerinin Hazırlanması ve Değerlendirilmesi, Planlama-Analiz-Fizibilite, Turhan Kitapevi, Ankara, 240 s.

Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., at al. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 114737.

SHURA (2024). Türkiye Enerji Dönüşümü Görünümü 2023. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Raporu. <https://shura.org.tr/wp-content/uploads/2024/04/SHURA-2024-04-Rapor-outlook-2023-2.pdf> (Erişim: 08.05.2025)

Tajouo, G. F., Kapen, P. T., & Koffi, F. L. D. (2023). Techno-economic investigation of an environmentally friendly small-scale solar tracker-based PV/wind/Battery hybrid system for off-grid rural electrification in the mount bamboutos, Cameroon. *Energy Strategy Reviews*, 48, 101107.

Wang, Y., He, X., Liu, Q., & Razmjoooy, S. (2024). Economic and technical analysis of an HRES (Hybrid Renewable Energy System) comprising wind, PV, and fuel cells using an improved subtraction-average-based optimizer. *Heliyon*, 10(12).

Woldegiyorgis, T. A., Asmare, E., Benti, N. E., Asefa, S. K., Assamnew, A. D., Desalegn, G. A., ... & Mossie, S. Y. (2025). Techno-economic feasibility analysis of a hybrid wind-PV-diesel energy system for Kiltu village, Oromia, Ethiopia using HOMER pro. *Environmental Research Communications*, 7(5), 055004.

Yılmaz, U., Demirören, A., & Zeynelgil, H. L. (2010). Investigation of the Potential for Electrical Energy Production with Renewable Energy Sources in Gökçeada. *Journal of Polytechnic*, 13(3), 215-223.

Yokoyama, R., Niimura, T., & Saito, N. (2008). Modeling and Evaluation of Supply Reliability of Microgrids Including PV and Wind Power. In *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* (pp. 1-5). IEEE.

BÖLÜM 10

ISUBU TARIM MAKİNELERİ VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ ÖĞRENCİLERİNİN YILLARA GÖRE DEMOGRAFİK YAPISININ İNCELENMESİ¹

Prof. Dr. Ahmet Kamil BAYHAN

GİRİŞ

Tarım; biyoloji, zooloji, toprak vb. birçok alt bölümü olan çok disiplinli veya disiplinlerarası bir bilim dalıdır. Ayrıca bitkisel ve hayvansal ürünlerden oluşan çok geniş bir üretim yelpazesi olduğu için çok yönlü bir işletme gibidir. Kısaca tarım ve hayvancılık bitkisel ve hayvansal üretim demektir. Tarla ve Bahçe Bitkileri, Bitki Koruma, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme, Tarımsal Biyoteknoloji vb. doğrudan bitkisel üretim bölümleridir. Hayvan yetiştirme ve hayvansal üretimi - hayvanların beslenmesi için gerekli yemlerin üretilip hazırlanması dâhil- üstlenen anabilim dalları Zootekni ve Su Ürünleri Mühendisliği bölümleridir. Bitkisel ve hayvansal ürünlerin nerede nasıl ne ölçekte üretileceği karar ve planlaması ise ekonomi ve işletmecilik bilimlerinin konusudur ve bu esasları tarıma uygulayan Ziraat Fakülteleri Tarım Ekonomisi bölümleridir. Gıda Mühendisliği ise tarımsal ürünlerin işlenmesi paketlenmesi vb. konularla ilgilenir. Gıda Mühendisliği

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

başlangıçta çoğu Ziraat Fakültesi bünyesinde olmalarına rağmen sonraki yıllarda beş-altı üniversitenin ziraat fakülteleri hariç (Atatürk, Bursa Uludağ, Ordu, Selçuk, Yakınoğlu vd.) hepsi ayrılarak Mühendislik Fakültelerine geçmişlerdir. Su Ürünleri Mühendisliği de sadece Ankara Üniversitesi ve Malatya Turgut Özal Üniversitesi Ziraat Fakültelerinde devam etmekte diğerleri ya Su Ürünleri ya da Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Fakülteleri ne geçmişlerdir. Kısaca bu bölümler ziraat mühendisi ünvanı dışında kendi unvan ve statüleri ile anılır ve çalışır olmuşlardır. Biyosistem Mühendisliğine veya Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliğine gelince: Bu bölümün son yıllarda kendisinden çok söz ettirmesinin nedeni; her alanda olduğu gibi Elektronik, Mekatronik, Bilgisayar ve Bilgi Teknolojileri (IT) vb. mühendislik dallarının dolayısı ile dijitalleşmenin hatta yapay zekânın hızla ilerlemesi sonucu tarımın hassas ve akıllı olarak yapılmaya başlanması hatta yaygınlaşmasıdır.

1. ZİRAAT VE BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİNİN OLUŞUM VE GELİŞİMİ

Yirminci Yüzyılın başında (1907) kurulan Amerikan Ziraat Mühendisleri Birliği (ASAE) yaklaşık 100 yıl sonra oluşan ihtiyaçlar ve yeni gelişmeler sonucu ilk kez 2005 de Amerika’da “Ziraat Mühendisliği” kavramı “Ziraat & Biyosistem Mühendisliği” olarak yenilenmiştir (ASABE, 2025). Birçok ülkede kurum ve üniversite ilgili bölümlerinin isim ve müfredatlarını aynı doğrultuda değiştirmekte, yenilemekte veya revize etmektedir. Belçika Liege’de 1930’da kurulan “Uluslararası Ziraat Mühendisliği Komisyonu” (CIGR: International

Commission of Agricultural Engineering) adı da 2008 yılından itibaren “Uluslararası Ziraat ve Biyosistem Mühendisliği Komisyonu (CIGR: International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering)” olarak değiştirilmiştir (CIGR, 2025).

Türkiye’de ise, ilk olarak 1953 yılında, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi altında, uluslararası anlamda “Ziraat Mühendisliği” - tarımda mühendislik- ile doğrudan ilgili olan “Tarım Makinaları Bölümü” kurulmuştur. Daha sonra 1970’de diğer bir tarımda mühendislik bölümü olan “Kültürteknik Bölümü” kurulmuş ve bu bölümün adı 1991’de “Tarımsal Yapılar ve Sulama” ya dönüştürülmüştür. Daha sonra, 1999’da, bölümler desteği ile programlar biçiminde eğitime başlanmış ve Tarım Makinaları ile Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümleri “Tarım Teknolojileri” programı altında kendi adları ile alt programlar biçiminde eğitimlerine devam etmişlerdir. Bu uygulamanın üzerinden fazla süre geçmeden tekrar bir değişiklik yapılmış ve tüm ziraat fakülteleri “Ziraat Mühendisliği” adıyla tek programa indirilmiş, tüm bölümler yine kendi adları ile bu program altında alt programlar biçiminde eğitimlerini sürdürmüştür. En son 2009 yılında alınan bir kararla, ziraat fakültelerinde eskiden olduğu gibi, tekrar bölüm bazında eğitime dönülmüştür (AÜZF, 2025).

Aynı yıllara denk gelen 2000’li yılların başında ASABE ve CIGR’a benzer bir yapılanmaya Türkiye’de de gidilmeye çalışılmıştır. İlk olarak 2000 yılında Bursa’da Tarımsal Mekanizasyon Kurulu 2. Eğitim Çalıştay’ında, ABD ve AB ülkelerinde değişik isimler altında ziraat ve benzer mühendislik eğitimleri yapıldığını, bunlardan en uygun olanın “Biyosistem Mühendisliği” olduğunu, konularının ise Tarım

Makinaları ile Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümlerinin konularını içerdiğini ve bu nedenle her iki bölümün içerisinde yer alacağı ve uluslararası düzeyde akredite olabilecek bir “Biyosistem Mühendisliği” programının açılması gerektiğine karar verilmiştir. Daha sonra, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölüm Başkanları 2007’de Ankara’da yaptıkları toplantıda, “ülkemizde Ziraat Fakültelerinin yeniden yapılandırılması çalışmaları kapsamında Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümünün Tarım Makinaları Bölümü ile birlikte “Biyosistem Mühendisliği” Lisans Programı açabilecekleri kararını almışlardır. Bu tarihi kararlardan sonra Uludağ Üniversitesi başta olmak üzere Kahramanmaraş Sütçü İmam, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitelerinin ilgili bölümleri 2009 yılında “Biyosistem Mühendisliği Bölümü”nü kurmuşlar ve öğrenci almaya başlamışlardır. Daha sonra, Namık Kemal, Yüzüncü Yıl, Adnan Menderes, Nevşehir, Adıyaman, Iğdır Erciyes Eskişehir Osman Gazi, Düzce ve Bozok Üniversiteleri aynı adlı bölümlerini kurmuşlardır. Kısaca ilk ve eski isimleriyle Tarım Makineleri ve Kültürteknik olan bu iki bölüm 17 üniversitede birleşerek ‘Biyosistem Mühendisliği Bölümü’ ismi ile yeniden yapılanmıştır. Biyosistem Mühendisliği adı altında birleşmeyi kabul etmeyen bu iki bölümün açık olduğu 11 üniversite daha vardır. Bu 11 üniversitenin 10 Ziraat Fakültesinde hem ‘Tarımsal Yapılar ve Sulama’ hem de ‘Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği’ bölümleri, 1 Tarım Bilimleri ve Teknolojileri Fakültesinde sadece ‘Tarım Makineleri ve Teknolojileri’ bölümü eğitim ve öğretim faaliyetlerini sürdürmektedir. Uluslararası temel ziraat mühendislik –tarım makinaları- eğitime uygun yukarıdaki 11 adet ‘Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği’ bölümüne 17 adet ‘Biyosistem Mühendisliği’

bölümünü de eklersek toplamda 28 üniversitede “Tarım Makineleri ve Biyosistem Mühendisliği” eğitim ve öğretimine devam edilmektedir.

Birleşmeyerek ayrı ayrı hizmet veren ve klasik adlarıyla devam eden bu bölümlerin bölüm adları ile aynı ad ile birer anabilim dalları varken; ‘Biyosistem Mühendisliği’ bölümlerinin her birinde ikişer olmak üzere toplamda dört anabilim dalları vardır ve bunlar şunlardır (TNKÜ, 2025):

1. Arazi ve Su Kaynakları
2. Tarımsal Enerji Sistemleri
3. Tarımsal Makine Sistemleri
4. Tarımsal Yapılar

Tarım Makineleri ve Biyosistem Mühendisliği lisans ve lisansüstü eğitim öğretiminin yapıldığı 28 üniversitenin 17’sinde yer alan Biyosistem Mühendisliği bölümlerinin farklı fakültelere göre dağılımına gelince: 14’ü Ziraat, 1’i Ziraat ve Doğa Bilimleri, 1’i Tarım Bilimleri ve Teknolojileri ve 1’i de Mühendislik olmak üzere görüldüğü gibi ağırlıklı olarak ziraat fakültelerinde yapılanmıştır. Dünya’daki gelişmelere paralel olarak ABD ve AB ülkelerinde ziraat ve benzer mühendislik eğitimlerinden en uygunu olan bizdeki “Biyosistem Mühendisliği” ve “Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği” bölümleri ulusal ve/veya uluslararası düzeyde akredite olma süreçlerini hızlandırmalıdır.

2. MATERYAL ve METOD

Bu çalışmanın materyali, Süleyman Demirel (SDÜ) ve Isparta Uygulamalı Bilimler (ISUBÜ) üniversiteleri Ziraat Fakülteleri Tarım Makineleri Bölümlerinden 2004-2025 arası mezun olan öğrencilerdir. Ancak Aralık 2025 itibarı ile mezun olan 26 kız 200 erkek olmak üzere toplam mezun 226 öğrenciden 146 sına ulaşılmıştır (Şekil 1). Ulaşılan 146 kişinin 102 si (% 69,9) anketi doldurarak yanıtlamışlardır. Ulaşılamayanlarla birlikte toplam 226 mezun içinde ankete katılabilen oranı 102/226 % 45,1 olarak gerçekleşmiştir (ISUBÜ, 2025).



Şekil 1. Tarım Makinaları Bölümünün SDÜ kuruluşundan günümüze geçirdiği safhalar.

Bu çalışmada metot: “Google Forms” üzerinde hazırlanan 1 Likert, 8 tam kapalı, 4 kısmen kapalı ve 5 ucu açık metin olmak üzere toplam 18 adet soru sorulmuş olup, mezunlar için kurulan “WhatsApp” grubunda paylaşılmış, Google Forms” kendi deskriptif analizlerine ilave olarak, ucu açık sorular; Grok, ChatGPT, Deepseek ve Gemini yapay zekâ destekleriyle yorumlanmıştır.

Isparta Ziraat Fakültesi tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği bölüm mezunları ile yapılan ankette katılımcılara araştırmanın amacı açıklanmış, gönüllülük esasına dayalı olarak yanıtlar toplanmış ve elde edilen veriler anonim şekilde değerlendirilmiştir. Veri toplama aracı olarak kullanılan anket formu, literatür ve saha deneyimlerine dayanarak geliştirilmiştir. Bu aşamada kendi bölüm mezun öğrencilerimiz yanında tamamı diğer üniversitelerin tarım makinaları lisans, yüksek lisans veya doktora mezunu kişilerle ortak bir hazırlık çalışması yapılmıştır. Bu ön çalışmada hepsi tarım makinaları lisans ve/veya lisansüstü diplomalı olan aşağıdaki şahıslar şu görevleri ağırlıklı olarak üstlenmişlerdir;

- WhatsApp Grubunun Kurulması: Murat KÜÇÜKALBAY & Göksel ÇALIŞKAN
- Google Anketinin Açılması ve Yönetimi: Süleyman KOŞTAŞ

- Google Anket Sorularının Geliştirilmesi: Dr. Galip ÖZTÜRK, Oğuz GÜL, Süleyman KOŞTAŞ, Gökhan GÜLŞEN ve Gizem Battal HET
- Ucu Açık Metin Sorularının Yapay Zekâ Programları ile Yorumu: Gökhan GÜLŞEN
- İstatistik Danışmanlık: Prof. Dr. Hikmet ORHAN

Anket soruları sırasıyla aşağıdaki gibidir:

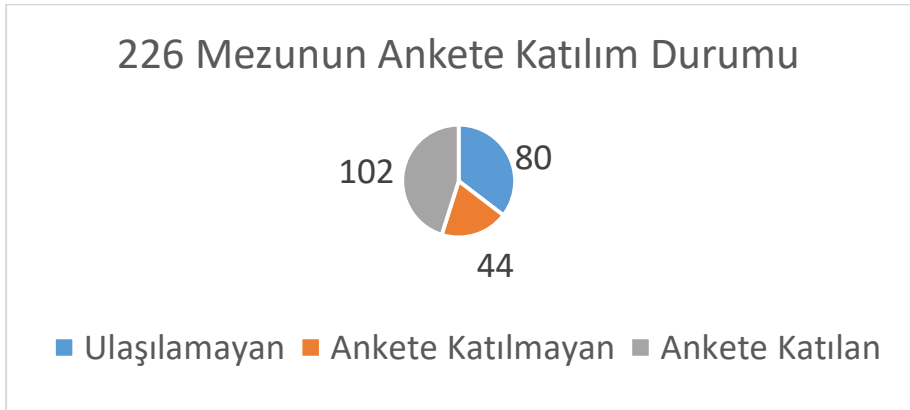
1. Cinsiyet 2. Mezun Olunan Lise 3. Kayıt Yılı 4. Mezuniyet Yılı
5. ÖSYM Bölümü Tercih Sıralaması 6. Mezuniyet Notu
7. Alınan Tarım Makinaları Eğitiminden Memnun Olunan Konular
8. Alınan Tarım Makinaları Eğitiminden Memnun Kalınmayan Konular
9. Aldığınız Tarım Makinaları Eğitimini Değerlendirir misiniz?
(1 En kötü....5 En iyi)
10. Mezuniyet Sonrası Yüksek Lisans Eğitim Durumu
11. Mezuniyet Sonrası Doktora Eğitim Durumu 12. Çalışılan Sektör Mülkiyeti
13. Çalışılan Alt Sektör 14. İşyerinde Çalışılan Birim 15. İşyerinde Çalışılan Pozisyon
16. Çalışma Hayatında Memnun Olunan Konular
17. Çalışma Hayatında Memnun Kalınmayan Konular
18. Eleştiriler ve Öneriler

Son aşamada bilgi, yorum, eleştiri ve öneriler, literatürdeki bulgularla birlikte değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda uygulamaya dönük çıkarımlar geliştirilmiştir.

Bu çalışma ile Tarım Makinaları Bölümü Ziraat Mühendislerinin mezuniyet öncesi ve sonrası karşılaştıkları problemler, nedenleri ve çözüm yaklaşımları kendi görüşleri doğrultusunda değerlendirmek hedeflenmiştir. Bu veriler göz önüne alınarak sektör için uygulanabilir ve pratik çözüm önerileri sunulmuştur.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

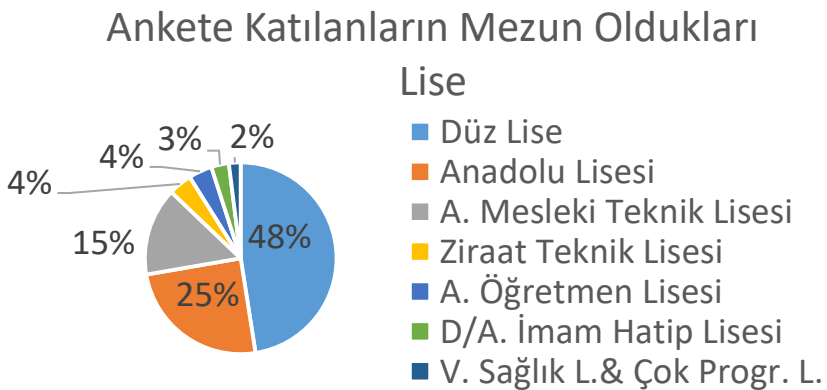
Isparta Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümünden 2003-2025 yılları arası mezun olan 226 kişiden 26'sı kadındır (% 11,50). Bunlar içinden rastgele yapılan e-ankete katılım sağlayan 102 kişiden ise 8'i kadındır (%7,84). Mezunlara ulaşma konusunda yaşanan sıkıntılar şöyle sıralanabilir: Eğitim Programının 4 kez bölüm adının da 2 kez değişmesi (Tarım Makinaları Bölümü, Tarım Teknolojileri/Tarım Makinaları Alt Programı, Ziraat Mühendisliği/Tarım Makinaları Alt Programı, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği). Üniversite adının 1 sefer değişmesi SDÜ ve ISUBÜ). Öğrenci kayıtlarının (telefon ve e-posta) sağlıklı şekilde korunamaması ve sürekli güncellenmenin yapılamaması. Bazı mezunların ankete katılma isteksizliği: Özellikle sektör dışı çalışan mezunlarda ankete katılım oranının düşük olduğu düşünülmektedir. Buna rağmen hedeflenen min 100 anket sayısına ulaşılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 226 Mezunun Ankete Katılım Durumu.

Anket sonuçları ile lisans eğitimlerini 7 yıllık normal sürede tamamlayanların oranı %93'tür. Normal süresinde lisans eğitimini bitiren 95 kişinin aritmetik ortalama bitirme süresi $4,9 \pm 1,13$ yıl iken ortanca değeri 5 yıldır. Dikey geçişle gelenler arasında iki kişi 2 yılda bir kişi de 3 yılda bitirmeyi başarmışlardır. Süresini aşır kaydı silinenler verilen ek haklar ile kalan ders ve ara verme süresine bağlı olarak ilk kayıt yılından itibaren en uzun 17 yıldır.

ÖSYM Sınavında bölümü kazanma tercih sırası sorusuna; iki kişi hatırlamadığını bir kişi ek kontenjanla girdiğini yazarken bir diğer kişi soruyu boş bırakarak yanıtlamamıştır. Tercih sırasını 1. tercih olarak en üstte 23 kişi; 2 kişi de 28. ve 29. sırada en altta bildirmişlerdir. Aritmetik ortalamadan standart sapması bu nedenle uzaklaşmıştır ($6,9 \pm 6,85$). Bölümü tercih sırasının uzun yıllar ortanca değeri 4. tercih olarak gerçekleşmiştir. SDÜ ve ISUBÜ Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları (TM) bölüm mezunlarının mezun oldukları liselere göre dağılımında: Düz Liselerden gelenler %48 oranla en büyük paya sahipken sırayla; Anadolu Liseleri %25, Anadolu Meslek Teknik %15, Anadolu Öğretmen %4, Ziraat Teknik %4, İmam Hatip %3 ve %2 oranla Veteriner Sağlık ve Çok programlı Lise mezunları en düşük paya sahiptir (Şekil 3).

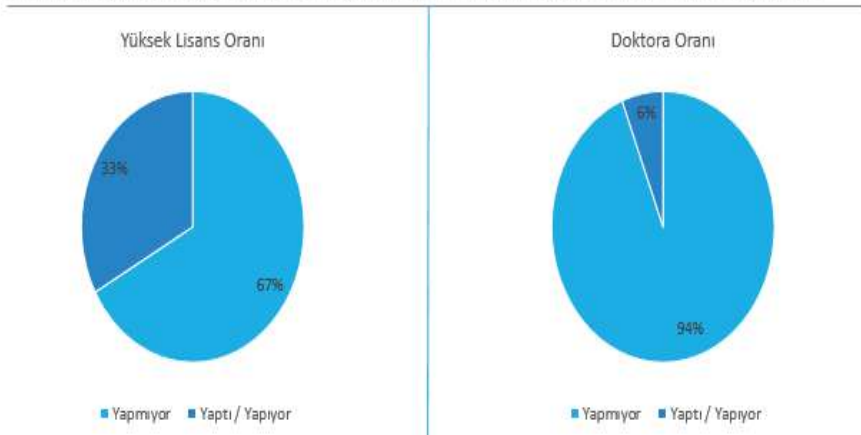


Şekil 3. Ankete katılanların mezun oldukları liselere göre dağılımı

100'lük veya 4'lük sisteme göre mezuniyet not ortalaması sorusuna 2 kişi hariç tüm katılımcılar yanıtlamıştır. Mezuniyet not ortalamasını 100 lük sisteme göre bildiren 15 kişinin aritmetik ortalama ve standart sapması $73,5 \pm 11,56$ iken; 4 lük sisteme göre bildiren 85 kişinin $2,58 \pm 0,449$ dur. Bu sonuçlara göre 100 lük sistemin geçerli olduğu 2010 yılına kadar elde edilen mezuniyet not ortalamasının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bu soruyu cevaplayan 100 kişiden alan içi veya dışı yüksek lisans yapıyor veya tamamlamış olanlar 33; doktoralı/yapıyor olanların ise 6 olması doktora giriş şartlarına zorluklarına bağlanabilir. Isparta Tarım Makinaları Bölümü mezunlarının akademik çalışmalara yönlendikleri düşünülebilir (Şekil 4).

Alan İçi veya Alan Dışı Lisans Üstü Eğitim Tamamlamış veya Yapıyor Olma Durumları



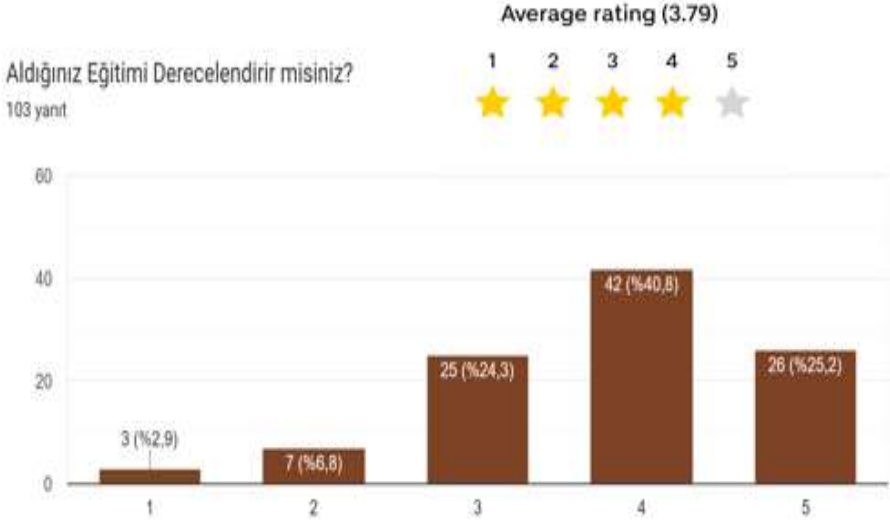
Şekil 4. Alan içi / alan dışı lisansüstü eğitim tamamlamış veya yapıyor olma durumları.

3.1 Alınan Eğitimin Değerlendirilmesi

3.1.1. Verilen Eğitimin Likert Ölçeğine Göre Puanlanması

En kötü değerlendirmenin 1 en iyinin 5 olduğu Likert ölçeği ile Tarım Makinaları Lisans Eğitimi memnuniyet yönünden değerlendirilmiştir. En yüksek seçim olan 4 (%40,8) ve 5 (%25,2) puanlamanın toplamı %66 ile

genelde eğitimden memnun olduğu düşünülebilir. Genel Aritmetik ortalama ve Standart sapması da $3,8 \pm 1,01$ dir (Şekil 5). Bununla birlikte ucu açık sorularla memnun kalınan ve kalınmayan hususlar ayrıca sorularak belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 5. Tarım Makinaları Eğitiminin Memnuniyet Yönünden Değerlendirilmesi.

3.1.2. Eğitimle İlgili Memnun Olunan Konular

SDÜ ve ISUBÜ Isparta Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümünden alınan Eğitim ile ilgili en çok memnun kalınan konular şöyle sıralanmıştır:

- Bölüm hocalarının bilgili ve yetkin olması,
- Mühendislik derslerinin yeterliliği,
- Uygulamalı yapılan dersler.

3.1.3. Eğitimle İlgili Memnun Olunmayan Konular

SDÜ ve ISUBÜ Isparta Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümünden alınan Eğitim ile ilgili memnun olunmayan ve en sık dile konular şöyle sıralanmıştır:

- Genel olarak derslerin teorik yapılması,

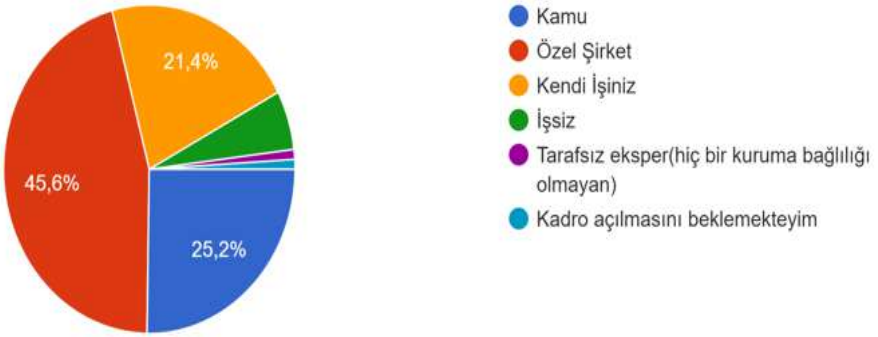
- Pratiğin yok denecek kadar az olması,
- Laboratuvarlar yeterli olsa da bizzat uygulamalı eğitimin yetersizliği.
- Sektörle bağlantı eksikliği vb.

3.2 Mezuniyet Sonrası Çalışma Hayatının Değerlendirilmesi

İş hayatı ile ilgili olarak şu sorulan sorular şöyledir: Çalışılan Sektör ve Mülkiyeti Nedir? Çalışılan Alt Sektör Nedir? İş Yerinde Hangi Birimde Çalışıyorsunuz? Çalıştığınız Yerde Hangi Pozisyonu Dolduruyorsunuz?

3.2.1. Çalışılan Sektör ve Mülkiyeti

Çalışılan Sektör & Mülkiyet sırayla şöyledir: Özel sektör (%45,6), Kamu (%25,2), Kendi işinde çalışanlar (%21,4), İşsiz olanlar (%5,8), bir kişi hiçbir kuruma bağlı olmayan tarafsız eksper (%1) ve bir kişi de KPS sınavında yeterli puan alıp devlet ataması beklediğini beyan etmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Çalışılan sektör ve mülkiyet durumu.

3.2.2. Çalışılan Alt Sektörler

Çalışılan Tarım Dışı Sektör anket şıkkı olarak her ne kadar %28,2 olmakla birlikte anket tam kapatılmadığı ve “Diğer” başlığı altında son şık açık bırakıldığı için çok dallanma olmuştur. Bunlar genel olarak arım içi tarım dışı olarak birleştirildiğinde yaklaşık olarak tarımla ilgili %60 tarım dışı %40 alt sektörde çalışıldığı saptanmıştır.

Detaya inildiğinde ise dağılım şöyle olmaktadır: Tarımsal Üretim yani doğrudan bitkisel ve/veya hayvansal üretim ile uğraşan alt sektörlerde çalışanlar (%20,4), Gıda, içecek, tarımsal ürünleri işleyenler vb. Tarıma Dayalı Sanayi de çalışanlar (%8,7), başta tarım makinaları imalat sanayi olmak üzere Tarıma Yönelik Sanayilerde çalışanlar (%12,6), Tarımsal Eğitim Araştırma (%5,8), Tarım Dışı Alt Sektörler (%28,2), diğer 25 (%24,3).

Sera Malzemeleri ve Kurulumu yanıtı ile başlayıp açık bırakıldığı için dallanan Diğer başlıklı şıkta toplanan yanıtların toplam oranı da %24,3 tür. Bu şık açık bırakıldığı için kendi içinde tekrar değerlendirilip ilgili diğer şıklarla birleştirilme zorunluluğu doğurmuştur. Bu şıkta bildirilen dallanan alt sektörler çoktan aza doğru sırasıyla şöyledir: Pompaj ve Sulama Sistemlerinin Projelendirilmesi ile uğraşan 4 kişi, Emniyet genel Müdürlüğü ve Jandarma Komutanlığında çalışan 3 kişi, Belediyelerde fakat yine doğrudan tarımla ilgili çalışan 2 kişi, İnşaat sektöründe 2 kişi, birer kişi de Sera Malzemeleri, Tarım Makinaları İmalatı, Tarımsal Otomasyon, Tarım Bankacılığı, Orman Ürünleri, Finans, Kamu Hukuku, Gençlik ve Spor İl Müdürlüğü, Turizm, Telekomünikasyon, Ambalaj, Reklamcılık, Ayakkabı Perakendeciliği (Esnaf) olmak üzere bu şıkta 103 anket katılımcısından 25 i (%24,3) çalıştıkları bu alt sektör bilgilerini detaylı paylaşmışlardır (Şekil 7).



Şekil 7. Katılımcı yanıtlarına göre çalışılan detaylı alt sektörler.

3.2.3. İş Yerinde Çalışılan Birim

Bu soruda çalışılan birim olarak şu şıklar verilmiştir:

1. Ar-Ge
2. İmalat
3. Pazarlama ve Satış
4. Satış Sonrası Hizmetler
5. İdari İşler
6. Diğer

Katılımcılar ilk 5 şıkkı verecekleri cevaba yeterli görmüyorlarsa 6. Şık olan “Diğer” i seçmişler ve buraya ankette olmayan işyerinde çalıştıkları birim adını eklemişlerdir. Bu soruda da “Diğer” tanımlı son şık açık bırakıldığı için çok dallanma olmuştur. Bu anketin değerlendirme sonuçlarına göre SDÜ ve ISUBÜ Tarım Makinaları Bölüm mezunlarının çalıştıkları birimler şöyledir: İdari İşler %23,3; Ar-Ge birimi %17,5; Pazarlama ve Satış %13,6; İmalat %4,9; oranında Satış Sonrası Hizmetler %3,9 ve Diğer %36,8 iş yerinde çalışılan birim olarak bildirilmiştir. “Diğer” şıkkı altında sayı olarak sırayla şu birim detayları verilmiştir: Şirket Sahibi 5, Tarımsal Üretim 4, Akademik Eğitim Öğretim 3, Güvenlik 2, Teknik Birim 2 ve 1’er kişi de; Pazarlama Satış Servis, Proje Müdürü, Saha Görevlisi, Laboratuvar Kalite Kontrol, Tarım İl Müdürlüğü Kırsal Kalkınma, Proje Çizim, Mühendis, Rusya Federasyonu Yaş Sebze & Meyve İhracatı Pestisit Kontrol, İdari İşler ve İmalat, Tohumluk Üretim, Sulama Projeleri, Analiz ve Sınıflama, Gübre İmalatının Tüm İşleri, Test Merkezi, Kamu Hukuku Danışmanı, Ulaştırma ve FİLO, Hizmet Sektörü, İş Güvenliği, Turizm, Bilişim Uzmanı (Şekil 8).

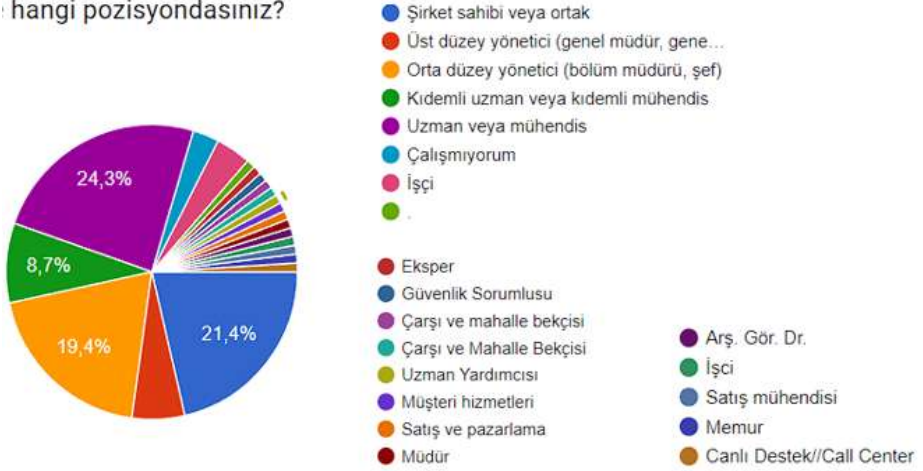


Şekil 8. Katılımcı yanıtlarına göre işyerinde çalışılan birim.

3.2.3. Çalışma Hayatında Doldurulan En Sık İş Pozisyonları

İşyeri pozisyonları & dağılımı şöyledir: %21,4 Şirket sahibi veya ortak, %4,4 Üst düzey yönetici (genel müdür, genel müdür yardımcısı, direktör, grup müdürü), %19,4 Orta düzey yönetici (bölüm müdürü, şef), %8,7 Kıdemli uzman veya kıdemli mühendis, %24,3 Uzman veya mühendis, %21,9 Diğer.

hangi pozisyondasınız?



Şekil 9. Çalışma Hayatında Doldurulan İş Pozisyonlarının Dağılımı

3.2.4. Çalışma Hayatında Alınan TM Eğitimi Nedeniyle Memnun Olunan Konular

Eğitim hayatının iş hayatına sağladığı destek ve kazanımlar nedeniyle en çok memnun olunan konular maddeler halinde özetlenmiştir:

- Alanında uzman ve tecrübeli hocalardan eğitim almış olmanın getirdiği avantajlar
- Verilen teorik ders içeriklerinin sağlamlığı
- Öğrencilerle hocalar arasındaki iyi iletişimin sosyal ve iş hayatında sağladığı avantajlar.
- Tarım teknolojisi yönünden iyi bir vizyon kazandırmış olması.

3.2.5. Çalışma Hayatında Alınan TM Eğitimi Nedeniyle Memnun Olunmayan Konular

Eğitim hayatından ve genel konjonktürden kaynaklanan iş hayatında görülen eksik ve yaşanan zorluklar maddeler halinde özetlenmiştir:

- Uygulamalı eğitim ve saha çalışmalarının azlığından kaynaklanan eksiklik ve zorluklar
- Laboratuvar, atölye ve makine ekipman altyapısının yenilenerek güncellenmesi
- Güncel teknolojilere (dijital tarım, otomasyon, yazılım vb.) daha çok yer verilmesi
- Mezuniyet sonrası sınırlı istihdam, sektördeki liyakat sorunları
- Fazla mezun verilmesine rağmen sektörün bu mezunları istihdam edememesi.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Yapay Zekâ Destekli Değerlendirmeler ve Çıkarılan Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, kuruluşundan beri SDÜ ve ISUBÜ Isparta Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları bölümünden mezun olan sahada çalışan ziraat mühendislerinin eğitim ve iş hayatları ile ilgili durumları incelenmiş eleştiri öneri her türlü görüşleri yapay zekâ program destekli olarak yorumlanmıştır. Diğer üniversitelerin ilgili bölümlerinden mezun olanlarla da yapılacak benzer anket çalışmaları ve güncel bilgilerin birlikte değerlendirmeleri, bölüm mezunlarının eğitim ve eğitim sonrası istihdam sorunlarına cevap verecektir.

En Sık Yapılan Eleştiri ve Öneriler

- Daha fazla uygulamalı ders ve staj.
- Üniversite–sanayi işbirliğinin artırılması.

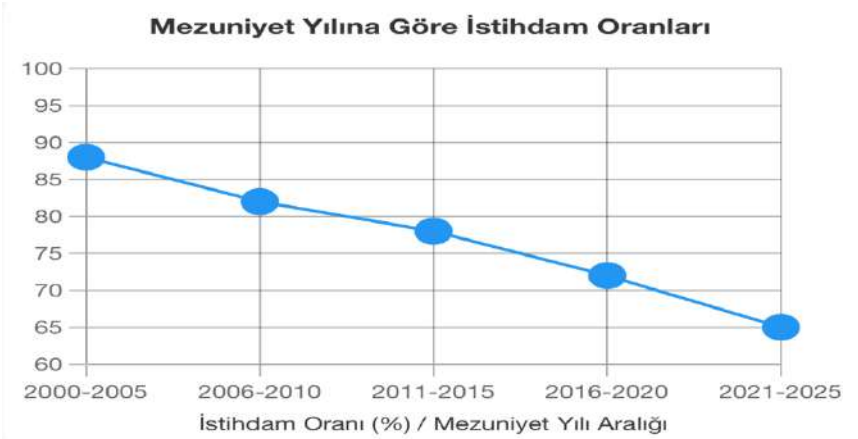
- Müfredatın güncel teknolojilere uyarlanması.
- Mezunlara yönelik kariyer takip ve destek mekanizmaları.
- Mezun sayısının kontrol edilmesi, kaliteye önem verilmesi.

Genel olarak mezunlar, eğitim-iş uyumsuzluğundan şikâyetçiler.

Düşük memnuniyet ve istihdam; sektör terkine yol açıyor.

- Memnuniyet, hoca kalitesine bağlı;
 - Likert puanlamasında Düşük puanlar (1-2) pratik eksikliğinden kaynaklanıyor.
 - Yüksek lisans doktora yapanlar daha olumlu.
- Eğitim teorik olarak güçlü ancak pratik eksikliği nedeniyle mezunlar iş hayatında kendilerini yetersiz hissediyor.
- Mezunların %40'ı tarım dışı sektörlerde çalışıyor;
 - Bölüm istihdam odaklı değil.
 - Kamu/özel dengeli ancak düşük maaş & mobing yaygın.
 - Y.L/PhD'liler daha iyi pozisyonda (Ar-Ge, yönetici).

Son Çeyrek Asırdır TM İstihdamı Gittikçe Daralmıştır



Şekil 10. SDÜ/ISUBÜ TM Mezunlarının yıllara göre istihdamları

Türkiye’de Tarım Makineleri, Teknolojileri ve Biyosistem Mühendisliği Kariyer Desteği – Mevcut Durum

- Türkiye tarımda geniş bir potansiyele sahip ancak tarım makineleri ve teknolojileri alanında dışa bağımlılık halen yüksek.
- Yerli üretim gelişse de Ar-Ge’ye yeterince kaynak aktarılmıyor.
- Biyosistem mühendisliği ise yeni gelişen bir alan; özellikle sulama, otomasyon, enerji kullanımı, dijital tarım gibi konularda önemli bir potansiyele sahip ama istihdam olanakları sınırlı.

Türkiye’de Tarım Makineleri, Teknolojileri ve Biyosistem Mühendisliği Kariyer Desteği – Sorunlar

- Fazla sayıda mezun verilmesi.
- Mezunların alan dışı sektörlerde çalışmak zorunda kalması.
- Üniversitelerde uygulamalı eğitimin yetersizliği.
- Sanayi ile akademi arasında işbirliğinin zayıf olması.
- Tarım makineleri üretiminde Ar-Ge eksikliği, ithal bağımlılığı.
- Kamu istihdamında sınırlı kontenjan ve liyakat sorunları.

Türkiye’de Tarım Makineleri, Teknolojileri ve Biyosistem Mühendisliği Kariyer Desteği – İyileştirme Önerileri

- Eğitim Reformu: Müfredata %50 pratik eklenmesi (saha/atölye, staj zorunluluğu); güncel teknolojilerin (otomasyon, yapay zekâ, robotik, dijital tarım) dâhil edilmesi. Fakülte sayısının sınırlanması, orta öğretim kalitesinin ve üniversite eğitim giriş puanlarının yükseltilmesi.

- Kariyer Desteği: Üniversite-sanayi işbirliği (staj, mentorluk); ZMO ile kariyer portalları, mezun ağlarının kurulması. Kamu kontenjanının artırılması, teşvik verilmesi (Ar-Ge hibeleri).
- Sektör İyileştirmeleri: Yerli üretim teşviki (KOSGEB destekleri), ithalat vergileri; dijital tarım eğitimlerinin yaygınlaştırılması. Meslek itibarının artırılması (sertifika programları, medya kampanyaları).
- Genel: Tarım politikalarının güçlendirilmesi (su yönetimi, sürdürülebilirlik); genç mühendislerin teşviki (startup fonları).

Dünyada tarım teknolojileri hız kazanırken, mezunlarımızın memnuniyeti hızla düşmektedir. Bu durum ülke genelinde detaylıca incelenmelidir.

- Mesleğini yapmayan, istihdam olunmayan, mezuniyet ortalaması düşük ve aldığı eğitimden memnun olmayan mezunların sayısının son yıllarda arttığı görölmektedir.
- Oysaki dünyada artan nüfus, küresel ısınma, geniş çaplı kuraklık, gıda arz ve kalitesine olan ihtiyaç sürekli artmaktadır.
- Bu durum akıllı tarım, hassas, dijital tarım gibi konuları gündeme getirmekte ve TarMak bölüm ilgi alanına girmektedir.
- Dünyada tarım teknolojileri hız kazanırken ölkemizde beklenen hızda gelişmemektedir.
- Benzer çalışmaların ölkemizdeki diğer Ziraat Faköltelerinin Tarım Teknolojileri Bölümleri mezunları arasında da yapılması ISUBÜ özelinde çıkan bu sonuçların Türkiye genelini yansıtır yansıtmadığı konusunda faydalı olacaktır.

KAYNAKÇA

- ASABE (2025) History: Home>About Us>About ASABE>History.
Erişim tarihi: 12 Aralık 2025, <https://asabe.org/about-us/about-asabe/history>
- CIGR (2025), Who We Are, CIGR History (2025). Erişim tarihi: 12 Aralık 2025, <https://cigr.org/node/80>.
- AÜZF (2025). Tarihçe. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü. Erişim tarihi: 12 Aralık 2025, <https://makina.agri.ankara.edu.tr/tarihce/>
- TNKÜ (2025). Tarihçe. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü. Erişim tarihi: 12 Aralık 2025, <https://ziraat-bm.web.nku.edu.tr/Tarih%C3%A7e/0/s/7920/10516#icerik>
- ISIUBÜ, 2025. Tarım Makinaları Bölüm Öğrenci İstatistikleri. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Öğrenci İşleri. Isparta 2025.

BÖLÜM 11

TARIM İŞLETMELERİNDE RÜZGÂR VE GÜNEŞTEN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN YATIRIM VE İŞLETME GİDERLERİNİN BELİRLENMESİ

Doç. Dr. Nusret MUTLU

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

GİRİŞ

Doğal Gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlardan oluşan yenilenemeyen enerji kaynaklarının artan tüketimi, sadece çevresel bozulmayı hızlandırmakla kalmamakta, aynı zamanda dünya genelinde ülkeler için enerji güvenliği risklerini de artırmaktadır. Bu ikilem, alternatif, çevre dostu enerji sistemlerini keşfetme ve uygulama zorunluluğunu artırmıştır. Bu bölümün amacı, güneş ve rüzgardan elektrik üretimi için yatırım ve işletme giderlerini değerlendirmektir. Böylece, her sistemin ekonomik uygulanabilirliği hakkında enerji planlaması ve politika yapımına yönelik değerli öngörüler sağlanmıştır.

Ekonomik uygulanabilirlik, rüzgar enerjisinin benimsenmesinde ve başarısında önemli bir rol oynar. Dünyanın farklı bölgeleri için çok sayıda ekonomik değerlendirme çalışmaları yapılmış ve sermaye yatırımları, işletme ve bakım maliyetleri, teknolojik ilerleme ve rüzgar enerjisinin pazar rekabet gücü gibi çeşitli yönle odaklanılmıştır. Bu çalışmaların önemli bir kısmında rüzgar çiftlikleri kurmak için gereken ilk yatırım maliyetleri değerlendirilmiştir. Krohn ve Ark., (2009) rüzgar enerjisi projelerinin toplam maliyetinin yaklaşık %75'inin türbinler,

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

temeller ve şebeke bağlantıları gibi ön harcamaların oluşturduğunu belirtmektedir. İyi rüzgar koşullarına sahip bölgelerin seçilmesi, elektrik maliyetini (LCOE) azaltır. Rüzgar türbinlerinin maliyet etkinliği, birçok çalışmada belirtildiği gibi, daha büyük türbinlerin daha maliyet etkin olmasıyla boyutlarından etkilenir. Bu bulgu, tesis boyutunun artmasıyla birim maliyetin azaldığı büyük ölçekli türbin rüzgar çiftliklerinin ekonomik faydalarını vurgulamaktadır. Türbin arıza oranları da rüzgar enerjisinin ekonomik değerlendirmelerinde önemli bir rol oynar. 10 MW türbinlerin arıza oranlarının 3 MW türbinlere kıyasla %30 oranında arttığı bildirilmiştir (Donnelly ve Ark., 2024). Dao ve Ark., (2019), rüzgar türbinlerinin arıza oranlarını ve bunların *Yaşam Döngüsü Enerji Maliyeti* (LCOE) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Diğer rüzgar çiftliği yapılandırmaları da araştırılmıştır. Zhang ve Ark., (2022), şebekeden bağımsız bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin tekno-ekonomik uygulanabilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Rüzgar türbini ve fotovoltaik (PV) sistemi içeren bir hibrit sistemin, sadece dizel bir sisteme kıyasla LCOE değerini azaltabileceğini belirlemişlerdir. Elektrolizörler kullanılarak hidrojen üretiminin entegrasyonu, bağımsız ve şebekeye bağlı (güneş/rüzgar/yakıt hücresi) yenilenebilir enerji sistemleri için uzun vadeli bir depolama stratejisi olabilir. Şebekeye bağlı dağıtılmış rüzgar türbini sistemlerinin, yerel güç üretimi ve azaltılmış iletim kayıpları için ekonomik olarak uygulanabilir olduğu belirlenmiştir (Murshed ve Ark., 2023).

İşletme ve bakım maliyetleri de rüzgar enerjisinin ekonomik analizlerinin kritik bir bileşenidir. Bu maliyetler genellikle diğer güç üretim yöntemlerinin işletme ve bakım maliyetleriyle karşılaştırıldığında daha düşük olsa da, zamanla artma eğilimindedir (Wiser ve Ark., 2023). Rüzgar çiftliklerinin ekonomik fizibilitesi ile ilgili bir diğer önemli konu, yaşlanmanın etkisidir. Staffell ve Green (2014), boyutlarından ve yaşlarından bağımsız olarak rüzgar türbinlerinin yılda ortalama %1,6 ($\pm 0,2$) güç bozulma oranı yaşadığını gözlemlemiştir. Ek olarak, lityum iyon aküler yaşlandıkça

kapasiteleri azalır, enerji depolama kapasitelerini etkiler ve potansiyel olarak değiştirilmeleri gerekir. La Varlet ve Ark. (2020), lityum iyon akülerin ömrünün yaklaşık 15 yıl olduğunu belirtmektedir. Enerji depolama, gün öncesi enerji ve rezerv piyasasında rüzgar enerjisi ticaretini optimize ederek önemli ölçüde daha yüksek kar marjlarına ulaşmak için önemlidir (Das ve Malakar, 2024). Tüm bu faktörler rüzgar enerjisi projelerinin uzun vadeli ekonomik performansını etkiler.

PV teknolojide, silikon bazlı PV hücreler güneş ışınımını elektrığe dönüştürür. Düşük sera gazı (GHG) emisyonları ve ekolojik ayak iziyle güneş enerjisi, yeşil enerji dönüşümüne öncülük ederek teknolojik gelişmelerini, ekonomisini ve çevresel etkilerini inceleme ihtiyacını vurgulamaktadır. 2035 yılına kadar ABD şebekesinin %95 oranında karbonsuzlaştırılmasını sağlamak için 2025-2030 yılları arasında her yıl 60 GW PV sistem kurulması gerektiği bildirilmektedir (Woodhouse ve Ark., 2023). Güneş enerjisi projelerinin ekonomik analizinde önemli bir konu, PV modüller ve aküler dahil olmak üzere sistemin sermaye maliyetidir. PV modüllerin maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %67'si düzeyindedir (Rehman ve Ark., 2017). Ramasamy ve Ark. (2023) tarafından belgelendiği gibi, güneş PV modüllerinin sermaye maliyetinde önemli bir azalma eğilimi olmuştur. Bangladeş'teki ticari ölçekli şebekeye bağlı 15 MW PV sistemlerine ilişkin yakın tarihli bir çalışmada (Nabil ve Ark., 2024), 327 USD/kW düzeyinde bir sermaye gideri önerilmiştir. Özellikle, sistem maliyetlerinin dengesi sistemin güç kapasitesine göre değişir. Akülerin maliyeti de gerekli depolama kapasitesine bağlı olarak değişir. Feldman ve Ark. (2021), Elektrik depolama ünitesi bulunan PV sistemin üretilen kWh elektrik başına toplam işletme maliyetini daha iyi temsil etmek amacıyla depolama ünitesine sahip PV sistemin dengelenmiş maliyeti (LCOSS) için bir formül türetmişlerdir. LCOSS, konut uygulamaları için 0,20 USD/kWh ve şebeke ölçeğindeki PV sistem için 0,08 USD/kWh olarak bildirilmiştir. Dikkate alınması gereken bir diğer faktör de PV modüllerinin zaman içinde bozulmasıdır. Liang ve You (2023), PV modüllerin genellikle yıllık güç bozulma oranının yaklaşık %0,5 düzeyinde olduğunu ve bu durumun uzun vadeli performanslarını ve

verimliliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. Bir PV sistemin amortismanının ekonomik uygulanabilirliği üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Huda ve Ark., 2023). Diğer taraftan işletme ve bakım maliyetlerindeki dalgalanmaların önemli bir etkisi olmamıştır. İşletme ve bakım maliyetleri genellikle kurulumun büyüklüğüyle orantılıdır.

1. RÜZGARDAN ELEKTRİK ÜRETİMİ İÇİN YATIRIM VE İŞLETME GİDERLERİ

Rüzgar santrallerinin ekonomik fizibilitelerinde hem sermaye maliyetleri hem de ayrıntılı işletme ve bakım maliyetleri değerlendirilir. Kurulu güç (kW) başına ABD doları (USD/kW) olarak tanımlanan sermaye maliyeti ile türbinlerin güç derecesi arasındaki ilişki Çizelge 1’de verilmiştir. Sonuçlar, Şekil 1 (a)’de gösterildiği gibi, türbin gücü ile kW güç başına USD olarak maliyet arasındaki ters ilişkiyi vurgulamaktadır. Sonuçlar, türbin boyutuna bağlı olan indirimlerden yararlanmak için şebeke ölçeğinde güç üretimi için büyük rüzgar türbinlerinin kurulumunu desteklemektedir.

Çizelge 1. Rüzgar Türbinlerinin Sermaye Maliyeti (Kafle ve Ark., 2025)

Türbin Anma Gücü (kW)	Yatırım Maliyeti (USD/kW)
600	1740
2400	1478
100	2750
3000	1541
6000	1150

ABD’de son yıllarda kurulan rüzgar santrallerinde ortalama 2–3 MW güce sahip rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Kafle ve Ark., (2025) tarafından, mevcut literatürün incelenmesinden toplanan bu güç aralığı için yatırım maliyeti verileri (Şekil 1(b)), aşağıdaki gibi basitleştirilmiş bir korelasyon oluşturmak için kullanılmıştır.

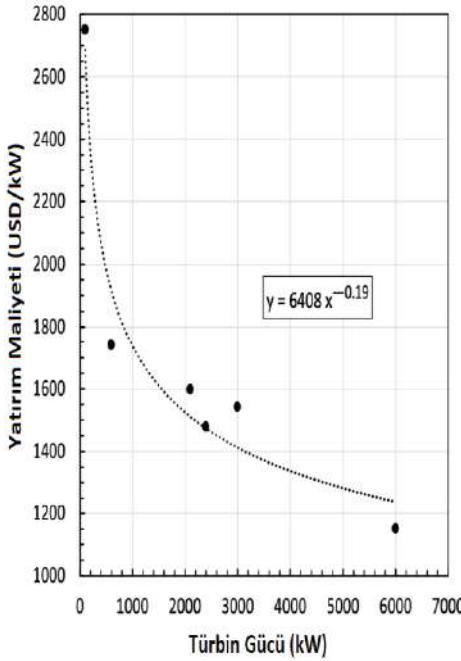
$$CC_{WT} = 0,0014 \times P_R \dots \dots \dots (1)$$

Burada:

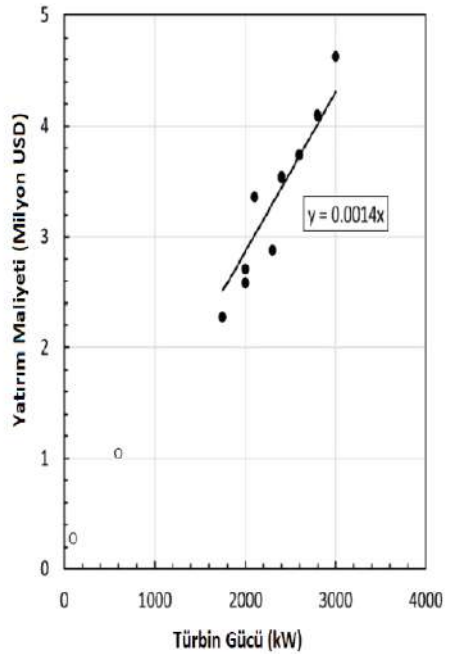
CC_{WT} = yatırım maliyeti (milyon USD) ve

P_R = türbinin nominal (anma) gücüdür (kW).

Eşitlik (2)'de verilen bu korelasyon, bu sınırlı (2–3 MW) güç aralığının dışındaki yatırım maliyetini tahmin etmek için doğru olmayacaktır ve gelecekteki fiyat tahminlerini içermemektedir. Sens ve Ark. (2022), deneyim eğrisi teorisini kullanarak 2050 yılına kadar rüzgar enerjisinin sermaye maliyetinde önemli azalmalar belirlemişlerdir. Bu durum, rüzgar enerjisini fosil yakıt bazlı elektrik üretim yöntemlerinden maliyet açısından daha rekabetçi hale getirecektir. Yatırım maliyeti (USD/kW), bireysel üretici ve modele özgü özelliklere bağlı olarak değişebilse de, eşitlik (2)'de verilen maliyet korelasyonu, 2–3 MW güç aralığına sahip türbinler kullanan rüzgar enerjisi projelerinin boyutlandırılması için yararlı bir araç olarak kullanılabilir.



a)



b)

Şekil 1 (a). Rüzgar türbinlerinin kilovat başına sermaye maliyetine türbin gücünün etkisi (2021/2022 USD/kW bazında) (b) Türbin boyutuna göre rüzgar türbinlerinin yatırım maliyeti (Kafle ve Ark., 2025)

Yatırım maliyetlerine ek olarak, rüzgar enerjisi sistemiyle ilişkili diğer maliyetler şunlardır:

- a) *Türbin işletme ve bakım maliyetleri*: Rüzgar türbinlerinin yıllık işletme ve bakım maliyetlerinin 27 USD/kW (Lopez ve Ark., 2024) olduğu tahmin edilmektedir. İşletme ve bakım maliyetleri verimli ve güvenilir elektrik üretimi için gereklidir. Bu maliyetler genellikle rutin bakım, denetimler, ekipman onarımları ve bileşenlerin değiştirilmesi gibi bir dizi faaliyeti ve ayrıca idari ve lojistik giderleri kapsar.
- b) *Akü maliyetleri*: Lityum iyon akü için ilk yatırım maliyeti 209 USD/kWh düzeyindedir (Mathews ve Ark., 2020). Bu maliyet, akü sisteminin satın alınmasını ve kurulumunu içerir. Hesaplamalarda, 15 yıllık çalışma süresinden sonra akülerin beklenen değişimi dikkate alınmaktadır (Le Varlet ve Ark., 2020).
- c) *Akü için işletme ve bakım maliyetleri*: Akü sisteminin yıllık işletme ve bakım maliyetlerinin akü çıkış gücü kW başına 9 USD olduğu tahmin edilmektedir (Jackson ve Ark., 2022). Bu maliyetler, rutin bakım, çalışma denetimi ve çalışma ömrü boyunca gerekli onarımlar dahil olmak üzere akü sisteminin düzgün çalışmasını ve sürdürülebilir performansını sağlamak için yapılan harcamaları kapsamaktadır.
- d) *Türbin güç bozulma oranı*: Bir türbinin verimliliğinde ve güç çıkışında zamanla meydana gelen kademeli azalmanın %1,8 olduğu tahmin edilmektedir (Staffell ve Ark., 2014).
- e) *Güvenlik için öngörülemez giderler*: Öngörülemez giderler için bir güvenlik marjı sağlamak amacıyla genel mali değerlendirmeye %10 oranında beklenmedik durum maliyet bileşeni dahil edilir (Kafle ve Ark., 2025).

1.1. Akü Kapasitesi

Şebeke dışı sistemlerde akü depolamasının ideal boyutu, rüzgar (ve güneş) enerjisinin çift döngüsel durağanlığından büyük ölçüde etkilenir. Mevsimsel ve günlük dalgalanmalar, yeterli depolama kapasitesi olmadan dengelenmesi imkansız olan sürekli enerji fazlası ve açığı dönemlerine neden olur. Mevsimsel döngüler, kış veya düşük rüzgarlı mevsimler gibi uzun süreli azalan yenilenebilir üretim dönemlerini telafi etmek için daha büyük depolama rezervleri gerektirirken, günlük döngüler günlük değişiklikleri yönetmek için kısa süreli depolama gerektirir. Günlük dalgalanmaları kontrol etme girişiminde sadece kısa süreli depolama dikkate alınır.

Akü depolama kapasitesini boyutlandırmak için aşağıdaki gibi üç durum dikkate alınmalıdır (Kafle ve Ark., 2025):

- 1) Rüzgar hızının *türbin devreye girme hızından* ($V_{cut\ in}$) düşük olduğu dönem ($t_{V < V_{cut\ in}}$): Bu süreçte, rüzgar türbininden güç çıkışı olmaz ve akülerin gerekli gücü sağlaması gerekir. *Türbin devreye girme hızı*, kanatların dönmeye ve güç üretmeye başladığındaki hızdır. Rüzgar hızları arttıkça, *nominal hız* olarak bilinen bir sınıra ulaşana kadar daha fazla elektrik üretilir. *Nominal hız*, türbinin maksimum veya nominal gücünü ürettiği noktadır. Devreye girme hızı basittir. Türbinin dönerek elektrik üretmeye başladığı durumdaki hızdır. Türbinin devreden çıkma hızı daha önemlidir. Rüzgar hızları daha fazla çalışmadan kaynaklanan hasar riskini artıracak kadar hızlanmadan önce, türbinin ne kadar hızda çalışabileceğini belirtir.
- 2) Rüzgar hızının, *devreye girme hızından* ($V_{cut\ in}$) büyük, ancak V_c hızından küçük olduğu dönem ($t_{V_{cut\ in} < V < V_c}$): Burada V_c , rüzgar türbininin nominal rüzgar hızına (V_r) ulaşmasa da gerekli güç (P_R) üretebildiği rüzgar hızı olarak tanımlanır. Bu durum, rüzgar türbini aşırı büyük olduğunda ve kurulu kapasite (P_I) gerekli güçten (P_R) büyük olduğunda, diğer bir deyişle ($P_I = P_R/C_F$) olduğunda mümkündür. Rüzgar hızı, V_c hızından küçük olduğunda, gerekli güç rüzgar çiftliğinden

sağlanmayacak ve toplum, yükü karşılamak için gerekli güç ile rüzgar türbinleri tarafından üretilen güç arasındaki farkın karşılanması için akü depolamasına bağımlı olmak zorunda kalacaktır. Bu basitleştirilmiş modelde, rüzgar hızı sınırlı aralıkta ($t_{V_{cut}} < in < V < V_c$) olduğunda, rüzgar hızının düzgün dağıldığı varsayılır Daha sonra, akülerin bu süre boyunca gereken gücün yarısını sağlaması gerekir.

- 3) Rüzgar hızının V_c değerini aştığı süre: Bu süre boyunca, rüzgar çiftliği yükü karşılamak ve aküleri şarj etmek için yeterli güç üretir.

Bu üç duruma dayanarak, kurulu akü kapasitesi (B_c ; MWh), yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$B_c = (t_{V < V_{cut}} \times P_R + t_{V_{cut} < V < V_c} \times 0,05 \times P_R) / (\eta_c \times \eta_d) \dots \dots \dots (2)$$

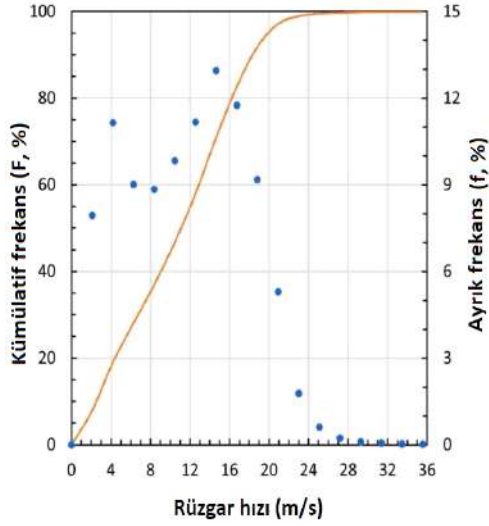
Burada, akülerin kullanım ömrünü artırmak için kurulu akü kapasitesi, akünün şarj/deşarj verimliliği (η_c ve η_d) ve gerekendeşarj derinliği dikkate alınarak büyük boyutlandırılmıştır.

Türbinin göbek yüksekliği olan 80 m yükseklikteki rüzgar hızı, 10 m yükseklikteki rüzgar hızı verilerinden, 0,355 değerinde *kesme faktörü* (α) ile eşitlik (3) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır (Tian ve Ark., 2023):

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \dots \dots \dots (3)$$

Burada; v_1 ve v_2 sırasıyla, $h_1 = 10$ m ve $h_2 = 80$ m göbek yüksekliğindeki rüzgar hızlarıdır.

Rüzgar türbininin güç eğrisi, türbinin her hızda çıkış gücünü hesaplamak için kullanılır. Her hızda üretilen yıllık enerji, türbinin güç çıkışı ile karşılık gelen rüzgar hızı aralığı için saat (h) olarak yıllık çalışma süresinin çarpılmasıyla hesaplanır. 10 m ve 80 m göbek yüksekliklerinde rüzgar hızının dağılımına ilişkin ayrık (f) ve kümülatif frekans dağılım fonksiyonu (F) Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. 80 m göbek yüksekliğindeki rüzgar hızının kümülatif (F) ve ayrik (f) dağılım fonksiyonları (Kafle ve Ark., 2025)

Rüzgar santralının boyutlandırılması ve gerekli yükü karşılamak için kurulu gücün (P_I) belirlenmesi ve kurulu akü depolamanın boyutlandırılması için aşağıdaki gibi tanımlanan *kapasite faktöründen* (CF) yararlanılır.

$$CF = \frac{E_W}{8760 \times P_I} \dots\dots\dots(4)$$

Burada:

CF = rüzgar santrali kapasite faktörü,

E_W = rüzgar santrali tarafından üretilen elektrik (MWh)
ve

P_I = rüzgar santrali kurulu gücüdür (kW).

1.2. Güneşten Fotovoltaik Elektrik Üretimi İçin Yatırım Ve İşletme Giderleri

Fotovoltaik (PV) santralin yatırım ve işletme/bakım maliyetlerinin belirlenmesi için ilk aşama gerekli kurulu gücün (P_I) hesaplanmasıdır:

$$P_I = \frac{24 \times P_R}{(h_s \times \eta_c)} \dots\dots\dots(5)$$

Burada:

P_I = kurulu güç (MW),

P_R = gerekli elektrik gücü (MW),

h_s = günlük bir güneş saati ve

η_c = akülerin şarj/deşarj verimliliğidir (%).

PV sistemin kurulu gücünün belirlenmesinde, güneş ışınımının mevcudiyeti dikkate alınmalıdır. Bu değer, güneş saati başına ölçülen güneş ışınımıdır. Diğer bir deyişle güneş ışınımının 1,0 güneş (1000 W/m²) olarak derecelendirilebileceği eşdeğer saat sayısıdır.

PV sistemin yatırım maliyeti, Şekil 3’de gösterildiği gibi, boyutunun bir fonksiyonudur. Güç ve yatırım maliyeti arasında ters bir ilişki vardır. Sistem boyutu arttıkça yatırım maliyeti (USD/kW) azalır. Bu durum ölçek ekonomisinin potansiyelini belirtir. Ramasamy ve Ark. (2021) tarafından yenilenebilir enerji sektöründe maliyetleri tahmin etmek ve kararları bilgilendirmek için yararlı bir model oluşturmak amacıyla verilere dayalı bir sermaye maliyeti modeli geliştirilmiştir:

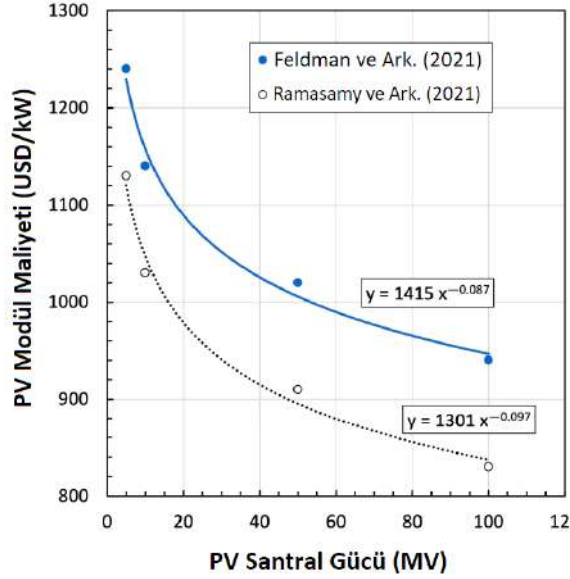
$$CC_{PV} = 1301 \times P_I^{-0,097} \dots\dots\dots(6)$$

Burada:

CC_{PV} = PV sistemin yatırım maliyeti (milyon USD) ve

P_I = PV sistemin kurulu gücüdür (MW).

Eşitlik (7)’de verilen yatırım maliyeti modeli, PV sistemler için 2021 fiyatlarıyla sınırlıdır ve aküleri veya arazi maliyetlerini içermemektedir.



Şekil 7. Fotovoltaik (PV) santral boyutunun PV modüllerin maliyetine etkisi (Kafle ve Ark., 2025)

PV modüllerinin fiyatlarında son yıllarda önemli ve fark edilir azalmalar olmuştur. Son veriler, PV modül fiyatlarındaki azalma eğiliminin azaldığını, daha kademeli bir azalma gözlemlendiğini göstermektedir. Feldman ve Ark. (2021) ve Ramasamy ve Ark. (2021) tarafından sunulan bulgulara göre, 2020-2021 döneminde 100 MW gücündeki sistemler için PV modüllerin maliyetinde %11,7 oranında azalma olmuştur. Lopez ve Ark., (2024) tarafından 2024 yılında, 1 MW gücündeki sistemler için PV modül yatırım maliyeti 1042 USD /kW olarak bildirilmiştir.

PV sistemin boyutlandırılmasındaki ikinci aşama, kurulu akü kapasitesini (B_c ; MWh) aşağıdaki şekilde hesaplamaktır:

$$B_c = \frac{(24 - h_s) \times P_R}{(\eta_c \times \eta_d)} \dots \dots \dots (7)$$

Burada:

- B_c = kurulu akü kapasitesi (MWh),
- h_s = günlük bir güneş saati,
- P_R = gerekli elektrik gücü (MW),
- η_c = akülerin şarj/deşarj verimliliği (%) ve

η_d = akü boşalma derinliğidir (%).

Bir lityum iyon akünü yatırım maliyeti, 209 USD/kWh olarak bildirilmektedir Mathews ve Ark. (2020). İşletme ve bakım maliyetleri ile PV sistemle ilişkili ek maliyetler şunlardır:

- PV sistemin işletme ve bakım maliyetleri:* Yıllık işletme ve bakım maliyetleri 18,4 USD/kW olarak dikkate alınır (Lopez ve Ark., 2024). Bu maliyet değeri, PV sistemin devam eden bakım ve işletme giderlerini hesaba katar.
- Akü işletme ve bakım maliyetleri:* Akü için yıllık işletme ve bakım maliyetleri, akü çıkışının kW gücü başına 9 USD olarak tahmin edilmektedir ve akü sisteminin bakım ve işletme giderlerini karşılamaktadır (Jackson ve Ark., 2024).
- Sistemin denge bileşenlerinin maliyetleri:* Mathews ve Ark. (2020) tarafından bu maliyetin 171 USD/kWh olduğu belirlenmiştir. PV sisteminin destekleyici altyapısı ve bileşenleriyle ilgili çeşitli giderleri içerir.

Bozulma ve güvenlik için öngörülemeyen giderler: PV modüllerin yıllık bozulma oranı %0,5 düzeyindedir (Liang ve You, 2023). Bu bozulma, PV sistemin verimliliğinde ve performansında zamanla bir azalmaya neden olur. Genel giderler içinde bir güvenlik marjı oluşturmak için %10 oranında olasılık/çeşitli maliyetler dahil edilir (Kafle ve Ark., 2025).

Çizelge 3. Fotovoltaik (PV) Santrallerin Boyutlandırılmasında Teknik ve Ekonomik Değişkenler (Kafle ve Ark., 2025)

Değişken	Birimi	Değeri
1 güneş saati/gün (h_s)	h	5,2
Akü dolma/boşalma verimi (η_s)	%	90
Akü boşalma derinliği (η_d)	%	90
PV bozulma oranı	%	0,5
PV sistem maliyeti	USD/kW _{AC}	819
PV sistemin yıllık işletme ve bakım giderleri	USD/kW	18,4
Akü maliyeti	USD/kWh	209

Akü sisteminin yıllık işletme ve bakım giderleri	USD/kW	9
Akü ömrü	yıl	15
Sistemin denge bileşenlerinin maliyetleri	USD/kWh	171

2. SONUÇ

Gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlardan oluşan yenilenemeyen enerji kaynaklarının artan tüketimi, sadece çevresel bozulmayı hızlandırmakla kalmamakta, aynı zamanda dünya genelinde ülkeler için enerji güvenliği risklerini de artırmaktadır. Bu ikilem, alternatif, çevre dostu enerji sistemlerini keşfetme ve uygulama zorunluluğunu artırmıştır. Bu bölümün amacı, güneş ve rüzgardan elektrik üretimi için yatırım ve işletme giderlerini değerlendirmektir. Böylece, her sistemin ekonomik uygulanabilirliği hakkında enerji planlaması ve politika yapımına yönelik değerli öngörüler sağlanmıştır.

Rüzgar türbinlerinin maliyet etkinliği, birçok çalışmada belirtildiği gibi, daha büyük türbinlerin daha maliyet etkin olmasıyla boyutlarından etkilenir. Bu bulgu, tesis boyutunun artmasıyla birim maliyetin azaldığı büyük ölçekli türbin rüzgar çiftliklerinin ekonomik faydalarını vurgulamaktadır. Türbin arıza oranları da rüzgar enerjisinin ekonomik değerlendirmelerinde önemli bir rol oynar. Şebekeye bağlı dağıtılmış rüzgar türbini sistemlerinin, yerel güç üretimi ve azaltılmış iletim kayıpları için ekonomik olarak uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Rüzgar türbini ve fotovoltaik (PV) sistemi içeren bir hibrit sistem, sadece dizel bir sisteme kıyasla LCOE değerini azaltabilir. İşletme ve bakım maliyetleri de rüzgar enerjisinin ekonomik analizlerinin kritik bir bileşenidir. Bu maliyetler genellikle diğer güç üretim yöntemlerinin işletme ve bakım maliyetleriyle karşılaştırıldığında daha düşük olsa da, zamanla artma eğilimindedir.

Güneş enerjisi projelerinin ekonomik analizinde önemli bir konu, PV modüller ve aküler dahil olmak üzere sistemin sermaye maliyetidir. PV modüllerin maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %67'si

düzeyindedir. Güneş PV modüllerin sermaye maliyetinde önemli bir azalma eğilimi olmuştur. Özellikle, sistem maliyetlerinin dengesi sistemin güç kapasitesine göre değişir. Akülerin maliyeti de gerekli depolama kapasitesine bağlı olarak değişir. Elektrik depolama ünitesi bulunan PV sistemin üretilen kWh elektrik başına toplam işletme maliyetini daha iyi temsil etmek amacıyla depolama ünitesine sahip PV sistemin dengelenmiş maliyeti (LCOSS) için bir formül türetmişlerdir. LCOSS, konut uygulamaları için 0,20 USD/kWh ve şebeke ölçeğindeki PV sistem için 0,08 USD/kWh olarak bildirilmiştir.

KAYNAKLAR

Dao C, Kazemtabrizi B, Crabtree C. Wind turbine reliability data review and impacts on levelized cost of energy. *Wind Energy*. 2019;22(12):1848–71. doi: 10.1002/we.2404.

Das P, Malakar T. A novel trading strategy to assess technoeconomics of wind farms in both energy and reserve markets. *e-Prime-Adv Electr Eng Electron Energy*. 2024;7:100444. doi: 10.1016/j.prime.2024.100444.

Donnelly O, Carroll J, Howland M. Analyzing the cost impact of failure rates for the next generation of offshore wind turbines. *Wind Energy*. 2024;27:695–710. doi: 10.1002/we.2907.

Feldman D, Ramasamy V, Margolis R. US Solar photovoltaic BESS system cost Benchmark Q1 2020 report (No. DE-AC36-08GO28308). National Renewable Energy Laboratory-Data (NREL-DATA)NREL-DATA. Golden (CO): National Renewable Energy Laboratory; 2021.

Huda A, Kurniawan I, Purba KF, Ichwani R, Fionasari R. Technoeconomic assessment of residential and farm-based photovoltaic systems. *Renew Energy*. 2024;222:119886. doi: 10.1016/j.renene.2023.119886.

Jackson N, Gunda T, Gayoso N, Desai J, Walker A. Operations, maintenance, and cost considerations for PV+ storage in the United States (No. SAND2022-16312). Albuquerque (NM): Sandia National Lab. (SNL-NM); 2022.

Jackson N, Gunda T, Gayoso N, Desai J, Walker A. Operations, maintenance, and cost considerations for PV+ storage in the United States (No. SAND2022-16312). Albuquerque (NM): Sandia National Lab. (SNL-NM); 2022.

Kafle B., Sallam, K.A., Hareland G. (2025). An economic comparison of wind, solar, and ocean thermal energy in the Federated States of Micronesia. *ACADEMIA ENGINEERING* 2025, 2 1 of 17. <https://doi.org/10.20935/AcadEng7722>.

Krohn S, Morthorst P-E, Awerbuch S. The economics of wind energy. Brussels: European Wind Energy Association; 2009.

Le Varlet T, Schmidt O, Gambhir A, Few S, Staffell I. Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage. *J Energy Storage*. 2020;28:101230. doi: 10.1016/j.est.2020.101230.

Liang H, You F. Reshoring silicon photovoltaics manufacturing contributes to decarbonization and climate change mitigation. *Nat Commun*. 2023;14(1):1274. doi: 10.1038/s4 1467-023-36827-z.

Lopez A, Pinchuk P, Gleason M, Cole W, Mai T, Williams T, et al. Solar Photovoltaics and Land-Based Wind Technical Potential and Supply Curves for the Contiguous United States. 2023 ed. No. NREL/TP-6A20-87843. Golden (CO): National Renewable Energy Laboratory; 2024.

Mathews I, Xu B, He W, Barreto V, Buonassisi T, Peters IM. Technoeconomic model of second-life batteries for utilityscale solar considering calendar and cycle aging. *Appl Energy*. 2020;269:115127. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115127.

Murshed M, Chamana M, Schmitt KEK, Bhatta R, Adeyanju O, Bayne S. Design and performance analysis of a grid-connected distributed wind turbine. *Energies*. 2023;16(15):5778. doi: 10.3390/en16155778.

Nabil MH, Barua J, Eiva URJ, Ullah MA, Chowdhury TA, Siddiquee SS, et al. Techno-economic analysis of commercialscale 15 MW on-grid ground solar PV systems in Bakalia: A feasibility study proposed for BPDB. *Energy Nexus*. 2024;14:100286. doi: 10.1016/j.nexus.2024.100286.

Ramasamy V, Feldman D, Desai J, Margolis R. US solar photovoltaic system and energy storage cost benchmarks: Q1 2021. No. NREL/TP-7A40-80694. Golden (CO): National Renewable Energy Lab. (NREL); 2021

Rehman S, Ahmed MA, Mohamed MH, Al-Sulaiman FA. Feasibility study of the grid connected 10 MW installed capacity PV power plants in Saudi Arabia. *Renew Sustain Energy Rev*. 2017;80:319–29. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.218.

Sens L, Neuling U, Kaltschmitt M. Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines—Development by 2050. *Renew Energy*. 2022;185:525–37. doi: 10.1016/j.renene.2021.12.042.

Staffell I, Green R. How does wind farm performance decline with age? *Renew Energy*. 2014;66:775–86. doi: 10.1016/j.renene.2013.10.041.

Tian Z, Zou X, Zhang Y, Gao W, Chen W, Peng H. 4E analyses and multi-objective optimization for an innovative solar ocean thermal energy conversion/air conditioning system. *J Clean Prod*. 2023;414:137532. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137532.

Wiser R, Bolinger M, Hoen B, Millstein D, Rand J, Barbose G, et al. *Land-Based Wind Market Report*. 2023 ed. Berkeley (CA): Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL); 2023.

Zhang X, Wei QS, Oh BS. Cost analysis of off-grid renewable hybrid power generation system on Ui Island, South Korea. *Int J Hydrogen Energy*. 2022;47(27):13199–212. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.01.150.

BÖLÜM 12

TARIM İŞLETMELERİ İÇİN RÜZGAR VE GÜNEŞTEN BİRLİKTE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN ÖLÇEKLENDİRİLMESİ¹

Doç. Dr. Nusret MUTLU

Dr. Öğretim Üyesi Ümran ATAY

Arş. Gör. Dr. Hasan Kaan KÜÇÜKERDEM

Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK

GİRİŞ

Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının artan payı, sürdürülebilir ve düşük karbonlu bir enerji sistemine kavuşmak için önemlidir. En yaygın kullanılan yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, rüzgar gücü (rüzgar) ve güneş fotovoltaik (güneş PV) sistemleri, kullanılabilirlikleri, ölçeklenebilirlikleri ve azalan maliyetleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Ancak, her iki kaynak da geleneksel üretim kalıpları sergileyerek bir elektrik şebekesi içinde arz ve talebi dengelemede zorluklara neden olmaktadır. Bu iki kaynak arasındaki ilişkiyi anlamak, enerji üretimini optimize etmek, kısıtlamaları en aza indirmek ve istikrarlı bir elektrik tedariki sağlamak için önemlidir.

Rüzgar ve güneş PV sistemi ile yapılan elektrik üretimi arasındaki denge, özellikle değişken yenilenebilir enerjinin yaygın olarak kullanıldığı bölgelerde enerji sistemi planlamasında önemli bir endişe haline gelmiştir. Rüzgar ve güneş PV sistemleri bir dereceye kadar birbirini tamamlayıcı olsa da, elektrik üretimini en üst düzeye çıkarırken, rezerv açıklarını en aza indiren optimum karışımı belirlemek için birleşik üretim özellikleri dikkatli bir şekilde analiz

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

edilmelidir. Başlıca zorluk, bu enerji kaynaklarının aralıklı doğasından kaynaklanmaktadır ve şebeke istikrarını ve kendi kendine yeterliliği artırmak için etkili stratejiler gerektirmektedir.

Son zamanlarda yeşil teknolojilerin geliştirilmesinde ufak bir gerileme olmuştur. Örneğin, ABD yeşil anlaşmalardan çekilmeyi planlamaktadır ve Avrupa aşırı hızlı temiz enerji geliştirme planlarının olumsuz ekonomik etkisini fark etmeye başlamıştır. Her şeye rağmen, yenilenebilir enerjinin gelişimi (özellikle rüzgar ve güneş) üst düzey yöneticilerin isteklerine bakılmaksızın devam etmektedir. Bunun arkasındaki itici güç, insanlığın gelecek nesiller için daha temiz bir çevre arayışıdır. Son yıllarda rüzgar ve güneş PV üretim ekipmanları arasındaki telafi edici özellikler ve bunların pratik uygulanabilirliği üzerine özel olarak çok fazla çalışma yapılmamıştır.

Bir çok bölgede güneş ve rüzgar enerjisinin potansiyeli önemlidir. Yerel enerji planlaması ve depolama çözümleri için güneş, rüzgar veya bunların birleşik enerji karışımının dikkate alınması gerekir. Birden fazla enerji kaynağının tek hibrit yenilenebilir enerji sistemine entegre edilmesi için, bireysel yenilenebilir sistemlerle ilişkili kesiklilik ve coğrafi sınırlamalar gibi zorluklar etkili bir şekilde değerlendirilmelidir. Bu nedenle, enerji verimliliği, dayanıklılık, istikrar ve sürdürülebilirlik gibi temel hedeflere ulaşmak için bir enerji yönetim sisteminin sürekli geliştirilmesi ve uygulanması çok önemlidir. Bu konularla ilgili çeşitli çalışmalar incelenmiş ve aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji üretiminin payının artırılması önemli bir konudur. Meister ve Ark (2025), rüzgar ve güneş PV sistemlerinin nasıl birlikte kullanılabileceğini değerlendirmişlerdir. Rüzgar üretimi ve güneş PV sistemi elektriğinin çakışmasını tahmin etmek için *gösterge talep karşılama faktörünü* kullanmışlardır. En iyi telafi olasılıklarının rüzgar üretimi ve güneş PV elektrik karışımının sırasıyla, 0,7/0,3 ve 0,8/0,2'ye eşit olması ve 0,62'lik bir talep karşılama faktörüne ulaşması olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışma, talep karşılama faktörünün tüketime kıyasla artan üretime bağımlılığını değerlendirmiştir. Talep karşılama

faktörlerinin etkisini araştırmak için farklı aküler kullanmışlardır. Bu araştırmanın temel amacı, enerji dengesini artıran ve harici enerji kaynaklarına bağımlılığı en aza indiren en etkili rüzgar ve güneş PV sistemi üretimi kombinasyonunu belirlemektir. Rüzgar ve PV sistem üretimi arasındaki dengeleme sorunları kapsamlı olarak değerlendirilmiş ve yenilenebilir enerji üretimini optimize etmek için veri odaklı yaklaşımların önemi vurgulanmıştır. Bu çalışma, daha güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji tedariki sağlamak için uygun bir enerji karışımı seçmenin, gelişmiş tahmin tekniklerini kullanmanın ve akü depolama çözümlerini dahil etmenin önemini vurgulamaktadır.

Benato ve Ark. (2022), enerji depolama sistemlerinin PV santralleriyle entegrasyonunu inceleyerek, sanal enerji santrali (VPP) modelinin PV güç zirvelerini etkili bir şekilde yumuşattığını ve tedarik istikrarını artırdığını belirtmişlerdir. Niu ve Luo (2023), günlük PV sistemleri ve depolama çözümlerinin ekonomik verimliliklerini araştırarak, optimize edilmiş depolama çerçevelerinin şebeke uyarlabilirliğini ve istikrarını artırdığını bildirmişlerdir. Ho-Tran ve Fiedler (2024), Almanya'nın yenilenebilir enerji üretiminde mevsimsel aşırı iklim olaylarını inceleyerek, durağan siklonik hava desenleri nedeniyle, yaz aylarında düşük güç üretiminin artan riskini vurgulamışlardır. Fasihi ve Ark. (2021), hibrit PV-rüzgar santralleri kullanarak yeşil amonyak üretiminin potansiyelini araştırmışlardır. Bu konuda 2040 yılına kadar maliyet açısından rekabetçi senaryolar belirlemişlerdir. Dietrich (2021), farklı iklimlerdeki sıfır enerjili binaları analiz ederek, arazi kullanım dengelerini ve optimize edilmiş yenilenebilir entegrasyon stratejilerini değerlendirmişlerdir. Salkuti (2021), yenilenebilir kaynaklar kullanılarak optimum demiryolu elektrifikasyonunu önermiş ve maliyet avantajlarını ve geliştirilmiş şebeke entegrasyonunu değerlendirmiştir. Chen ve Ark. (2022), Kuzey Avrupa'da yenilenebilir enerji dağıtımında arazi kullanım çatışmalarını inceleyerek açık deniz rüzgar genişlemesinin arazi talebini azaltabileceği sonucuna varmışlardır. Silva ve Ark., (2022), yenilenebilir enerji piyasası katılımını optimize etmek için stokastik bir yaklaşım önermişler ve önemli kar kazanımları ve dengesizlik

azalmaları bildirmişlerdir. Nnodim ve Ark., (2022) etkili kesintililik yönetimi için kısıtlama ve depolama önererek rüzgar ve güneşin elektrik şebekelerine entegrasyonunu değerlendirmişlerdir. Al-Dahidi ve Ark. (2018), daha iyi şebeke yönetimi için tahmin doğruluğunu artıran PV güç tahminleri için makine öğrenimi modelleri geliştirmişlerdir. Santos-Alamillos ve Ark. (2012), İber Yarımadası'nda rüzgar-güneş uzaysal-zamansal dengelemesini inceleyerek eş yerleştirmenin üretim değişkenliğini azalttığı sonucuna varmışlardır. Veluchamy ve Veluchamy (2021), dağıtılmış şebekelerde maliyet azalmaları sağlayan mikro şebeke enerji yönetimi için bir optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Velosa ve Ark. (2023), optimizasyon stratejilerinin test edilmesini kolaylaştıran enerji topluluğu güç talebi ve üretim senaryoları için açık kaynaklı bir simülatör geliştirmişlerdir. Lippert (2014), etkili çıktı kontrolü ve yardımcı hizmet sağlamayı belirterek rüzgar çiftliklerinde lityum iyon enerji depolamasını tartışmışlardır. Tafarte ve Ark. (2017), rüzgar ve güneş PV sistemlerden kaynaklanan dalgalanmaları azaltmada biyoenerjinin rolünü araştırmış ve esnek biyoenerji operasyonunun şebeke kararlılığını artırdığı sonucuna varmışlardır. Schmidt ve Ark. (2016), Brezilya'nın hidrotermal sistemini analiz ederek, termal yedekleme ihtiyaçlarını azaltmada rüzgar-PV genişlemesinin faydalarını vurgulamışlardır.

Carbajales-Dale ve Ark. (2014), rüzgar ve güneş PV sistemleri için depolama enerjisi maliyetlerini değerlendirmiş ve rüzgar enerjisinin büyük ölçekli depolamayı destekleyebileceğini, PV sistemlerinin ise depolama uygunluğu açısından sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Haegel ve Kurtz (2023), küresel PV benimseme eğilimlerini izleyerek, hızlı genişleme ve artan depolama entegrasyonunu değerlendirmişlerdir.

Hadi ve Ark. (2020), mikro şebekelerde yenilenebilir enerji artışını optimize etmek, pik talebi azaltmak ve sistem dengesini iyileştirmek için bir talep tepkisi algoritması önermişlerdir. Stamatakis ve Ark. (2024), süper tankerlerde enerji yönetimini inceleyerek, PV-rüzgar-hidrojen entegrasyonu yoluyla CO₂ azaltımlarını

değerlendirmişlerdir. Shepherd ve Ark. (2022), depolama ihtiyaçlarını değerlendirerek ve stratejileri dengeleyerek yeşil amonyak üretimi için fizibilite araçları geliştirmişlerdir. Hou ve Ark. (2021), mevsimsel üretim değişkenliğindeki değişiklikleri belirleyerek, iklim değişikliğinin güneş enerjisi üretimi üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Madiba ve Ark. (2017), mikro şebekelerde düşük frekanslı yük atımını optimize ederek yenilenebilir enerji entegrasyonu yoluyla güvenilirliği artırdığını bildirmişlerdir.

Coles ve Ark. (2023), gel-git akışı gücünün enerji sistemi güvenliği üzerindeki etkisini inceleyerek, arz-talep dengelemesindeki rolünü değerlendirmişlerdir. Jiang ve Ark. (2023), şebekeye bağlı mikro şebekelerde enerji yönetimi için makine öğrenimi uygulayarak, maliyet azaltımları ve verimlilik iyileştirmeleri sağlamışlardır.

Yapılan araştırmalar genel olarak değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının varlığında dengeleme faaliyetlerini başarmak için; sanal bir enerji santrali modeli kullanma, yeşil amonyak üretme, enerji depolama elemanlarını dahil etme, güneş PV üretimini tahmin etmek için makine öğrenimi modelleri kullanma, vb farklı önlemler kullanılmaktadır. Tüm bu önlemler daha önemli kar oranları için önceliklendirilir. İkinci çıktı, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla özellikleri dengelemektir.

Üçüncü yön, çevresel etkiyi azaltmaktır. Rüzgar ve güneş PV üretimi genellikle birbirine eşlik eder. Yenilenebilir enerji kaynaklarını dengelemek için farklı yöntemleri kullanılmakla birlikte, rüzgar ve güneş enerjileri arasında kendi kendini dengeleme olasılıklarını kullanma konusuna özel önem verilmesi gerekmektedir.

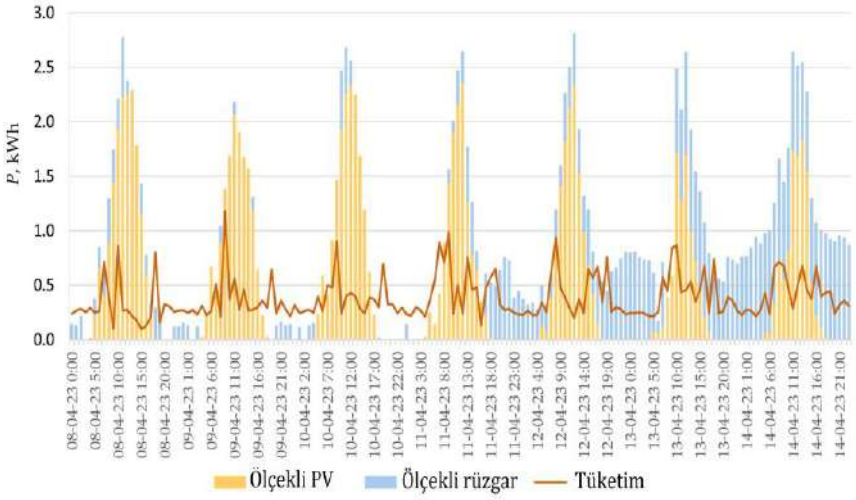


Şekil 1. Hayvancılık işletmesinde güneş enerjisinden elektrik üretimi

1. RÜZGAR VE GÜNEŞTEN BİRLİKTE ELEKTRİK ÜRETİMİNİN DENGELENMESİ

1.1. Rüzgardan Elektrik Üretimi

Rüzgar ve PV sistemi üretim verilerinin çakışmasını takip etmek için en iyi zaman ilkbahardır. Rüzgar türbini ve PV sistemin üretim verileri Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Bir hafta süreyle üretim ve tüketim ölçekli profiller
(Meister ve Ark., 2025)

Rüzgar türbini üretimi ve PV sistem verilerinin ölçeklendirilmesi, her iki yıllık veri setinin toplamalarının yıllık tüketimin toplamına eşit olduğu anlamına gelir. 10 m yükseklikten rüzgar hızı değerleri kullanılarak, rüzgar türbini TUGE20 için başlangıç verileri olarak 18 m yükseklikteki rüzgar hızı değerleri aşağıda verilen logaritmik eşitlik ile tahmin edilir (Meister ve Ark., 2025).

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \dots\dots\dots (1)$$

Burada;

V_1 = 10 m yükseklikte ölçülen rüzgar hızı (m/s),

V_2 = 18 m yükseklikteki rüzgar hızı (m/s),

h_1 = İklim istasyonunda rüzgar hızı ölçme yüksekliği (10 m),

h_2 = Rüzgar türbini göbek yüksekliği (18 m) ve

z_0 = Düz bir arazi için pürüzlülük katsayısıdır ($z_0 = 0,03$).

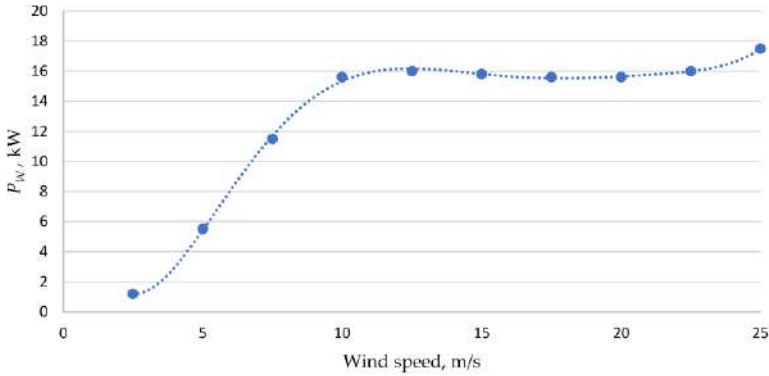
TUGE20 türbini için güç eğrisi (Şekil 3), eşitlik (2) kullanılarak geliştirilebilir (Meister ve Ark., 2025):

$$P = 7 \times 10^{-6} \times V_2^6 - 0,0006V_2^5 + 0,022V_0^4 + 0,3904V_2^3 + 3,3587V_0^2 - 10,894V_2 + 12,753 \dots\dots\dots(2)$$

Burada;

P = Rüzgar türbininde üretilen güç (kW) ve

V_2 = 18 m yükseklikteki rüzgar hızıdır (m/s).



Şekil 3. TUGE20 türbini için güç eğrisi (Meister ve Ark., 2025)

1.2. Güneşten Elektrik Üretimi

PV panellerin gerçek çıkış verileri, iklim istasyonunda yatay düzlemde ölçülen güneş ışınlamı verilerinden yaklaşık olarak hesaplanır. Bu işlem eşitlik (3) yardımıyla ışınlam geliş açısının hesaplaması ile başlar (Meister ve Ark., 2025).

$$A_f = \cos(\theta_z) \times \cos(\beta) + \sin(\theta_z) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma_s - \gamma) \dots\dots\dots(3)$$

Burada;

A_f = Işınlam geliş açısı (°),

θ_z = Zenit açısı (°),

β = Yüzeyin düzlemi ile yatay arasındaki açı (°),

γ_s = Güneş Azimut açısı (°) ve

γ = Yüzey Azimut açısıdır (°).

Açık gökyüzü indeksi aşağıdaki gibi hesaplanır (Erbs ve Ark., 1982):

$$K_t = \frac{GHI}{G_0 \times \cos(\theta_z)} \dots\dots\dots(4)$$

Burada;

- K_t = Açık gökyüzü indeksi,
- GHI = Yatay yüzeye gelen toplam güneş ışınlamı (W/m^2),
- G_0 = Güneş sabiti ($1367 W/m^2$) ve
- θ_z = Zenit açısıdır ($^\circ$).

Yatay yüzeye gelen yaygın ışınlam (DHI , W/m^2) aşağıdaki gibi hesaplanır (Erbs ve Ark., 1982):

$$DHI = GHI \times (1 - F) \dots\dots\dots(5)$$

Bu eşitlikte F aşağıdaki gibi belirlenir:

- $K_t < 0,35$ $F = 1 - 0,249$
- $0,35 \leq K_t < 0,75$ $F = 1,575 - 1,84$
- $K_t \geq 0,75$ $F = 0,1$

Normal doğrudan ışınlam aşağıdaki gibi belirlenir:

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{G_0 \times \cos(\theta_z)} \dots\dots\dots(6)$$

Burada;

- DNI = Normal doğrudan ışınlam (W/m^2),
- GHI = Yatay yüzeye toplam güneş ışınlamı (W/m^2),
- DHI = Yatay yüzeye gelen yaygın ışınlam (W/m^2),
- G_0 = Güneş sabiti ($1367 W/m^2$) ve
- θ_z = Zenit açısıdır ($^\circ$).

Doğrudan güneş ışınlamı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_{dir} = DNI \times A_f \dots\dots\dots(7)$$

Burada;

- G_{dir} = Doğrudan güneş ışınlamı (W/m^2),
- DNI = Normal doğrudan ışınlam (W/m^2) ve
- A_f = Işınlam geliş açısıdır ($^\circ$).

Yaygın güneş ışınlamı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_{dif} = DHI \times \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \dots\dots\dots(8)$$

Burada;

G_{dif} = Yaygın güneş ışıınımı (W/m²),

DHI = Yatay yüzeyde ölçülen toplam güneş ışıınımı (W/m²)
ve

β = Yüzeyin düzlemi ile yatay arasındaki açıdır (°).

Yansıtılan güneş ışıınımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_{ref} = GHI \times \frac{(1 - \cos(\beta))}{2} \dots\dots\dots(9)$$

Burada;

G_{ref} = Yansıtılan güneş ışıınımı (W/m²),

GHI = Yatay yüzeye gelen toplam güneş ışıınımı (W/m²) ve
 β = Yüzeyin düzlemi ile yatay arasındaki açıdır (°).

Toplam ışıınım aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_t = G_{dir} + G_{dif} + G_{ref} \dots\dots\dots(10)$$

PV panelin elektrik üretme gücü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = G_t \times S \times \eta \dots\dots\dots(11)$$

Burada;

P = PV panelin elektrik üretme gücü (W)

G_t = Toplam güneş ışıınımı (W/m²),

S = PV panelin yüzey alını (m²) ve

η = PV panelin verimidir (%).

1.3. Rüzgar Ve Güneşten Birlikte Elektrik Üretiminin Ölçeklendirilmesi

Rüzgar türbini ve PV panellerin yıllık elektrik üretimleri, yıllık elektrik tüketimine eşit olacak şekilde ölçeklendirme yapılabilir. Elektrik tüketimine göre ölçeklendirilen PV panellerin üretimi aşağıdaki gibi belirlenir (Meister ve Ark., 2025):

$$P_{PV}^s(h) = K_{PV} \times P_{PVh} \dots\dots\dots(12)$$

Burada;

P_{PV^s} = PV sistemin yıllık elektrik tüketimi toplamına eşit olarak ölçeklendirilmiş yıllık elektrik üretimi (kWh),

P_{PVh} = PV sistemin saatlik elektrik üretimi (kWh) ve

K_{PV} = PV sistem için ölçeklendirme katsayısıdır.

PV sistem için ölçeklendirme katsayısı aşağıdaki gibi belirlenir (Meister ve Ark., 2025):

$$K_{PV} = \frac{W_{cy}}{W_{PVy}^s} \dots\dots\dots(13)$$

Burada;

K_{PV} = PV sistem için ölçeklendirme katsayısı,

W_{cy} = Yıllık toplam elektrik tüketimi (kWh) ve

W_{PVy}^s = PV sistemin yıllık toplam elektrik tüketimidir (kWh).

Elektrik tüketime göre rüzgar türbininin elektrik üretimi aşağıdaki gibi belirlenir:

$$P_w^s(h) = K_w \times P_{wh} \dots\dots\dots(14)$$

Burada;

P_w^s = Rüzgar türbininin yıllık elektrik tüketimi toplamına eşit olarak ölçeklendirilmiş yıllık elektrik üretimi (kWh),

P_{wh} = Rüzgar türbininin saatlik elektrik üretimi (kWh) ve

K_w = Rüzgar türbini için ölçeklendirme katsayısıdır.

Rüzgar türbini için ölçeklendirme katsayısı aşağıdaki gibi belirlenir:

$$K_w = \frac{W_{cy}}{W_{wy}^s} \dots\dots\dots(15)$$

Burada;

K_w = Rüzgar türbini için ölçeklendirme katsayısı,

W_{cy} = Yıllık toplam elektrik tüketimi (kWh) ve

W_{wy}^s = Rüzgar türbininin yıllık toplam elektrik tüketimidir (kWh).

Burada; W_{wy} - rüzgar türbininin yıllık toplam elektrik üretimidir (kWh).

Tüketime eşit olan toplam üretim aşağıdaki gibi belirlenir:

$$P_t(h) = aP_{PV}^s(h) + bP_w^s(h) \dots\dots\dots(16)$$

Burada; $a = 0-1$ ve $b = (1-a)$ 'dır.

Modellenen gösterge, *öz tüketim oranı* veya başka bir deyişle, *talep karşılama faktörüdür* (Y_D) (Lin ve Ark., 2023).

$$Y_D = \frac{\int_{t_0}^{t_1} P_D dt + \int_{t_1}^{t_2} P_S dt}{\int_{t_0}^{t_2} P_D dt} \dots\dots\dots(17)$$

Burada; P_S - yerel güç kaynağı ve P_D - yerel güç talebidir. $P_D(t) \leq P_S(t)$ zamanı $t_0 \dots t_1$ olarak gösterilir ve $t_1 \dots t_2$, $P_D(t) \geq P_S(t)$ zamanıdır (Gorjian ve Ark., 2022). *Talep karşılama faktörü*, yerel arzın enerji talebini karşılama oranı olarak tanımlanır ve "*öz üretimi*" belirtir.

Öz tüketimin en yüksek olduğu farklı yıllarda en iyi rüzgar ve PV elektriğinde farklılıklar olup olmadığı araştırılır. Dalgalanmanın marjları belirlenir ve optimum akü boyutunu değerlendirir. Yıllar arasındaki üretim kapasitelerini karşılaştırmak için *kapasite faktörü* (CF) kullanılır (Lyu ve Ark., 2021):

$$CF = \frac{\int_0^{8760} P dt}{P_r \times t} \dots\dots\dots(18)$$

Burada;

P = Yıllık üretim için saatlik kapasite (kW),

P_r = Üretim sisteminin nominal kapasitesi (kW) ve

t = Yıllık çalışma süresidir ($t = 8760$ h).

Kapasite faktörü, yıllık gerçek üretim, düşünülebilir üretim ve yıllık kalıcı nominal üretim arasındaki bölümdür. *Çoğaltma katsayısı* (F_D), aşağıdaki gibi hesaplanır (Lin ve Ark., 2021):

$$F_D = \frac{P_{mix}}{\int_{t_0}^{t_2} P_D dt} \dots\dots\dots(19)$$

Burada;

P_{mix} = Rüzgar türbini ve PV sistemin karma üretimi (kWh) ve

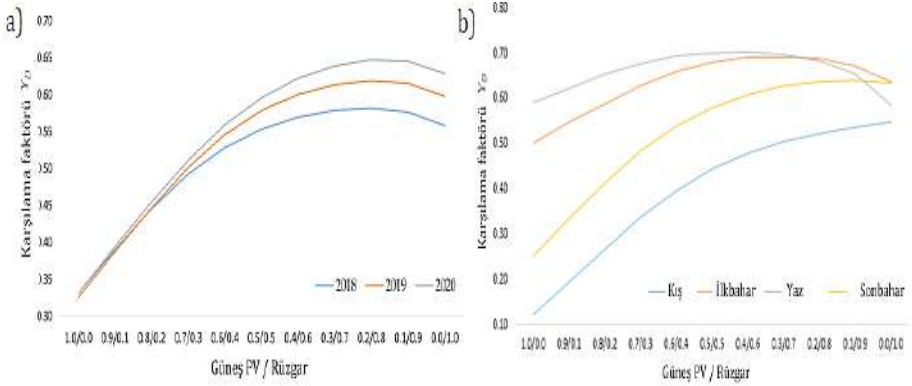
P_D = Yıllık elektrik tüketimidir (kWh).

1.4. Rüzgar Ve Güneşten Birlikte Elektrik Üretiminin Yorumlanması

Rüzgar türbini ve PV sistemin elektrik üretiminin dengelenmesi için yapılan hesaplamaları yorumlamak önemlidir. Farklı elektrik üretim karışımları açısından talep karşılama faktörü (Y_D) Şekil 4’de verilmiştir. Rüzgar türbini ve PV sistem tarafından üretilen farklı elektrik üretim karışımlarının talep karşılama faktörüne (Y_D) olan bağımlılığı Şekil 5’de belirtilmektedir. 2019 yılının en yüksek değeri olan $Y_D = 0,62$, aynı anda 0,2/0,8 ve 0,3/0,7 elektrik karışımı değerleri ve PV ve rüzgar sistemleri için belirlenmiştir. Bu alanda eğri oldukça düzgündür, %100 PV sistemi tarafında hızla düşer, $Y_D = 0,33$ ve rüzgar payı %100 olduğunda rakamın karşı tarafında, $Y_D = 0,6$ ’dır. Bu durum, rüzgar üretiminin Y_D üzerinde güneş PV sistemlerinden daha fazla etkiye sahip olduğu anlamına gelir (Meister ve Ark., 2025).

Dünya genelinde optimum rüzgar ve PV elektrik karışımının farklı göstergeleri dikkate alınmaktadır. ABD’de, üretim ve günlük yükü dengelemek için optimum enerji karışımları, güneş üretimindeki gece boşluğu nedeniyle, yaklaşık %80 rüzgar enerjisi ve %20 PV’den oluştuğu bildirilmiştir (Zhao ve Ark., 2019a). (Zhao ve Ark., (2019b) ABD’de beklenen yük taşıma kapasitesini hesaplayarak, en iyi sonuçları rüzgar ve güneş PV’nin %75/25 karışımında belirlemişlerdir. Lyu ve Ark. (2020) Japonya verilerinin ilk istatistiksel analizi, uyumsuzluğun standart sapmasını en aza indiren hidrotermal, jeotermal ve biyokütle enerjisinin optimum karışımının ve teorik enerji depolama kapasitesinin %75 güneş ve %25 rüzgar gücünün bir kombinasyonu olduğunu belirlemişlerdir. Bu durum, bu karışımın diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birleştirildiğinde tam

tersi olabileceği anlamına gelir. Buna karşılık, %80/20 rüzgar-güneş enerjisi karışımına sahip bir senaryo, genel fazlalığı azaltır ve kalan fazlalığı tahkim etmek için mükemmel bir fırsat sunar (Grätzel, 2003). Sonuç olarak, mevcut kaynaklar oldukça eskidir ve optimum enerji karışımı yönteme ve diğer yenilenebilir kaynakların eşlik etmesine bağlıdır.



Şekil 4. (a) Farklı elektrik üretim karışımları için talep karşılama faktörü (Y_D) (b) Talep karşılama faktörünün (Y_D) kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde ayrı ayrı olmak üzere rüzgar ve PV sistemlere olan bağımlılığı (Meister ve Ark., 2025)

Küçük dağıtık şebekeler planlanırken rüzgar ve güneş PV üretim ekipmanlarının aşırı boyutlandırılmasının önlenmesi esastır. En iyi seçenek yüksek bir öz tüketim seviyesine sahip olmaktır. Bunun ekonomik bir etkisi vardır. Şebekeden satın alınan daha az elektrik çevresel etkiyi azaltır. Şebekeden alınan elektrik büyük ölçüde fosil yakıtlarla üretilir. Ekolojik etki üretim sisteminin seçimine bağlıdır. Yüksek CF değeri, rüzgar koşullarının rüzgar ve güneş PV sistemi üretimi arasında sadece küçük bir dengeleme etkisi sağlar. Buna karşın rüzgar için daha düşük CF değerlerinin dengeleme etkisini artırır. Meister ve Ark. (2025) tarafından yapılan bir çalışmada rüzgar ve güneş PV'nin en iyi dengeleyici payları en azından kuzey yarımküreye ve rüzgar ve güneş PV'nin farklı CF değerlerine göre genelleştirilmiştir.

2. SONUÇ

Günümüzde, her biri belirli ve farklı işlevler sunan, PV sistemleri tasarlamak için çeşitli yazılım araçları mevcuttur. Ancak, bu araçlar genellikle uygun entegrasyondan yoksundur. Bu durum tamamen tutarlı ve uygulanabilir bir projenin geliştirilmesini engelleyen parçalı ve bağlantısız iş akışlarına neden olur. Bina Bilgi Modeli (BBM) yönteminin PV sistem tasarımına entegrasyonu, tasarım sürecinin daha verimli, koordineli ve sürdürülebilir yönetimine doğru önemli bir ilerlemeyi temsil eder. BBM yaklaşımı, sistemin geometrik, enerji, ekonomik ve zamansal yönlerini ortak bir ortamda entegre edebilen üç boyutlu bilgi modellemesine olanak tanır. Gelen güneş ışınımı, gölgeleme ve sistem performansı üzerinde ön analizler yapma olanağı, daha yüksek doğruluk ve hesaplamaların gerçekleştirilme sürelerinde önemli bir azalma sağlar. Bu nedenle BBM, piyasada sunulan mevcut çözümlerin aksine, tasarımın tutarlı, entegre, iş birliğine dayalı ve dinamik bir şekilde yürütülmesini sağlar. Bu amaçla önerilen iş akışı, merkezi bir BBM modelinden başlayarak, BBM yazılımları arasında bilgi kaybı olmadan sorunsuz bir geçiş sağlayarak tasarım tutarlılığını garanti altına alır ve hata riskini azaltır. Standartlaştırılmış ve tekrarlanabilir bir yöntem geliştirme amacıyla tasarlanan iş akışı, en temel aşamadan en ayrıntılı aşamaya kadar tüm proje aşamalarında profesyonellere rehberlik edebilir. Yöntem, Ciccozzi ve Ark., (2025) tarafından, farklı mimari özellikler ve coğrafi konumlarla karakterize edilen iki durum çalışmasında test edilmiştir. BBM sayesinde, manuel tasarım uygulamalarıyla doğru bir şekilde analiz edilmesi zor olan çok sayıda etmeni dikkate alarak çeşitli tasarım stratejilerini kısa sürede değerlendirmek olanaklı duruma gelir. İki durum çalışmasında yapılan analizler, yönelim, eğim, PV teknoloji, iklim vb. değişkenlerin sistem performansı üzerinde nasıl büyük bir etkiye sahip olabileceğini göstermiştir. Bu konuda Ciccozzi ve Ark., (2025) tarafından aşağıdaki bulgular belirlenmiştir:

- Uygun iklim koşulları, enerji üretimini %18 oranını kadar artırabilir.

- Optimum eğim %10 oranına kadar fayda sağlayabilir.
- PV modüllerin güneşe yönlendirilmesi, daha yüksek sistem performansı sağlar. Ancak bu mümkün değilse, en uygun olanı belirlemek için birkaç hipotezi karşılaştırmak gerekir.
- En fazla enerji verimliliği sağlayan çözümün en uygun çözüm olduğu kesin değildir. En yararlı stratejiyi belirlemek için bir maliyet-performans analizi yapmak gerekir.

Bu bağlamda, BBM, stratejik tasarım seçimleri yapmak için temel bir araç olduğunu, sistemi optimize edebildiğini ve enerji üretimi ile maliyetler arasında iyi bir denge sağlayabildiğini kanıtlamıştır. Enerji tasarrufu ve çevresel etkiyi azaltma düzenlemelerinin giderek daha katı hale geldiği bir bağlamda, BBM ekolojik geçiş büyük destek sağlayan bir araç olabilir.

KAYNAKLAR

Al-Dahidi, S.; Ayadi, O.; Adeeb, J.; Alrbai, M.; Qawasmeh, B.R. Extreme Learning Machines for Solar Photovoltaic Power Predictions. *Energies* 2018, 11, 2725.

Benato, A.; De Vanna, F.; Stoppato, A. Levelling the Photovoltaic Power Profile with the Integrated Energy Storage System. *Energies* 2022, 15, 9521.

Carbajales-Dale, M.; Barnhart, C.J.; Benson, S.M. Can We Afford Storage? A Dynamic Net Energy Analysis of Renewable Electricity Generation Supported by Energy Storage. *Energy Environ. Sci.* 2014, 7, 1538–1544.

Chen, Y.; Kirkerud, J.G.; Bolkesjø, T.F. Balancing GHG Mitigation and Land-Use Conflicts: Alternative Northern European Energy System Scenarios. *Appl. Energy* 2022, 310, 118557.

Ciccozzi, A.; de Rubeis, T.; Go, Y.I.; Ambrosini, D. PV System Design in Different Climates: A BIM-Based Methodology. *Energies* 2025, 18, 3866. <https://doi.org/10.3390/en18143866>.

Coles, D.; Wray, B.; Stevens, R.; Crawford, S.; Pennock, S.; Miles, J. Impacts of Tidal Stream Power on Energy System Security: An Isle of Wight Case Study. *Appl. Energy* 2023, 334, 120686.

Dietrich, U. Zero-Energy Buildings in Cities with Different Climates and Urban Densities: Energy Demand, Renewable Energy Harvest On-Site and Off-Site and Total Land Use for Different Renewable Technologies. *Int. J. Energy Prod. Manag.* 2021, 6, 335–346.

Erbs, D.G.; Klein, S.A.; Duffie, J.A. Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation. *Solar Energy* 1982, 28, 293–302.

Fasihi, M.; Weiss, R.; Savolainen, J.; Breyer, C. Global Potential of Green Ammonia Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Appl. Energy* 2021, 294, 116170.

Gorjian, S.; Bousi, E.; Özdemir, Ö.E.; Trommsdorff, M.; Kumar, N.M.; Anand, A.; Kant, K.; Chopra, S.S. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using

semi-transparent photovoltaic technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, 158, 112126.

Grätzel, M. Dye-Sensitized Solar Cells. *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* 2003, 4, 145–153.

Hadi, A.; Silva, C.A.S.; Hossain, E.; Challoo, R. Algorithm for Demand Response to Maximize the Penetration of Renewable Energy. *IEEE Access* 2020, 8, 55279–55288.

Haegel, N.M.; Kurtz, S.R. Global Progress Toward Renewable Electricity: Tracking the Role of Solar (Version 3). *IEEE J. Photovolt.* 2023, 13, 768–776.

Ho-Tran, L.; Fiedler, S. More Summertime Low-Power Production Extremes in Germany with a Larger Solar Power Share. *Solar Energy* 2024, 283, 112979.

Hou, X.; Wild, M.; Folini, D.; Kazadzis, S.; Wohland, J. Climate Change Impacts on Solar Power Generation and Its Spatial Variability in Europe Based on CMIP6. *Earth Syst. Dyn.* 2021, 12, 1099–1113.

Lin, J.; Shi, D. Photothermal and photovoltaic properties of transparent thin films of porphyrin compounds for energy applications. *Appl. Phys. Rev.* 2021, 8, 011302.

Lin, J.; Lyu, M.; Shi, D. 3D Solar Harvesting and Energy Generation via Multilayers of Transparent Porphyrin and Iron Oxide Thin Films. *Energies* 2023, 16, 3173.

Lippert, M. Balancing Renewables with Li-Ion Energy Storage. *Power* 2014, 158, 34.

Lyu, M.; Lin, J.; Krupczak, J.; Shi, D. Solar harvesting through multilayer spectral selective iron oxide and porphyrin transparent thin films for photothermal energy generation. *Adv. Sustain. Syst.* 2021, 5, 2100006.

Jiang, H.; Du, E.; He, B.; Zhang, N.; Wang, P.; Li, F.; Ji, J. Analysis and modeling of seasonal characteristics of renewable energy generation. *Renew. Energy* 2023, 219, 119414.

Madiba, T.; Bansal, R.C.; Justo, J.J.; Kusakana, K. Optimal Control System of under Frequency Load Shedding in Microgrid System with Renewable Energy Resources. In *Smart Energy Grid*

Design for Island Countries; Green Energy Technology; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; pp. 71–96.

Meister, R.; Yaïci, W.; Moezzi, R.; Gheibi, M.; Hovi, K.; Annuk, A. Evaluating the Balancing Properties of Wind and Solar Photovoltaic System Production. *Energies* 2025, 18, 1871. <https://doi.org/10.3390/en18071871>.

Niu, X.; Luo, X. Policies and Economic Efficiency for Distributed Photovoltaic and Energy Storage Industry. *Distrib. Gener. Altern. Energy J.* 2023, 38, 1197–1222.

Nnodim, C.T.; Kpu, G.C.; Okhuegbe, S.N.; Ajani, A.A.; Adebayo, S.; Diarah, R.S.; Aliyu, S.J.; Onokwai, A.O.; Osueke, C.O. Figures of Merit for Wind and Solar PV Integration in Electricity Grids. *J. Sci. Ind. Res.* 2022, 81, 349–357.

Silva, A.R.; Pousinho, H.M.I.; Estanqueiro, A. A Multistage Stochastic Approach for the Optimal Bidding of Variable Renewable Energy in the Day-Ahead, Intraday and Balancing Markets. *Energy* 2022, 258, 124856.

Santos-Alamillos, F.J.; Pozo-Vázquez, D.; Ruiz-Arias, J.A.; Lara-Fanego, V.; Tovar-Pescador, J. Analysis of Spatiotemporal Balancing between Wind and Solar Energy Resources in the Southern Iberian Peninsula. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2012, 51, 2005–2024.

Schmidt, J.; Cancelli, R.; Pereira, A.O. The Role of Wind Power and Solar PV in Reducing Risks in the Brazilian Hydro-Thermal Power System. *Energy* 2016, 115, 1748–1757.

Shepherd, J.; Haider Ali Khan, M.; Amal, R.; Daiyan, R.; MacGill, I. Open-Source Project Feasibility Tools for Supporting Development of the Green Ammonia Value Chain. *Energy Convers. Manag.* 2022, 274, 116413.

Silva, A.R.; Pousinho, H.M.I.; Estanqueiro, A. A Multistage Stochastic Approach for the Optimal Bidding of Variable Renewable Energy in the Day-Ahead, Intraday and Balancing Markets. *Energy* 2022, 258, 124856

Stamatakis, M.E.; Stamatakis, E.E.; Stamelos, A.P.; Ioannides, M.G. Energy Management in a Super-Tanker Powered by Solar,

Wind, Hydrogen and Boil-Off Gas for Saving CO₂ Emissions. *Electronics* 2024, 13, 1567.

Tafarte, P.; Hennig, C.; Dotzauer, M.; Thrän, D. Impact of Flexible Bioenergy Provision on Residual Load Fluctuation: A Case Study for the TransnetBW Transmission System in 2022. *Energy Sustain. Soc.* 2017, 7, 3.

Velosa, N.; Gomes, E.; Morais, H.; Pereira, L. PROCSIM: An Open-Source Simulator to Generate Energy Community Power Demand and Generation Scenarios. *Energies* 2023, 16, 1611.

Veluchamy, K.; Veluchamy, M. A New Energy Management Technique for Microgrid System Using Muddy Soil Fish Optimization Algorithm. *Int. J. Energy Res.* 2021, 45, 14824–14844.

Zhao, Y.; Dunn, A.W.; Shi, D. (2019a). Effective reduction of building heat loss without insulation materials via the photothermal effect of a chlorophyll thin film coated “Green Window”. *MRS Commun.* 2019, 9, 675–681.

Zhao, Y.; Lin, J.; Kundrat, D.M.; Bonmarin, M.; Krupczak, J.; Thomas, S.V.; Lyu, M.; Shi, D. (2019b). Photonicallly-Activated Molecular Excitations for Thermal Energy Conversion in Porphyrinic Compounds. *Phys. Chem. C* 2019, 124, 1575–1584.

TARIMSAL ÜRETİMDE ENERJİ VE MEKANİZASYON ARAŞTIRMALARI

