



BOTANİK BİLİMİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR

Doç. Dr. Sema LEBLEBİCİ



İKSAD
Publishing House

BOTANİK BİLİMİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR

Doç. Dr. Sema LEBLEBİCİ

YAZARLAR

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI

Prof. Dr. Cihan DARCAN

Prof. Dr. Edip AVŞAR

Prof. Dr. Mahmut KAPLAN

Prof. Dr. Uğur BAŞARAN

Doç. Dr. Ali KARANFİL

Doç. Dr. Burcu ÇETİN

Doç. Dr. Erdem GÜLÜMSER

Doç. Dr. Filiz RANDA-ZELYÜT

Doç. Dr. Gamze KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Murat KARAER

Dr. Öğr. Üyesi Nurgül ERGİN

Öğr. Gör. Dr. Gülçin ÇETİN KILIÇASLAN

Öğr. Gör. Dr. Osman TÜRKYILMAZ

Öğr. Gör. Dr. Özge KAYGUSUZ İZGÖRDÜ

Dr. Beyza ÇİFTÇİ

Dr. Hüseyin İZGÖRDÜ

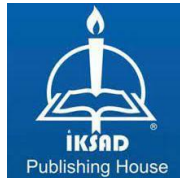
Dr. Mustafa ÇOMAKLI

Dr. Yusuf Murat KARDEŞ

Arş. Gör. Cihat GEDİK

Emine TOPÇU

Gülperin DURSUN



Copyright © 2025 by iksad 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. Institution of Economic Development and
Social Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-279-5
Cover Design: İbrahim KAYA
July / 2025
Ankara / Türkiye
Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
-------------------	----------

BÖLÜM 1

NANOTEKNOLOJİNİN BİTKİ BİYOTEKNOLOJİSİNDEKİ UYGULAMALARI

Doç. Dr. Burcu ÇETİN.....	3
---------------------------	---

BÖLÜM 2

BİTKİ BESLENMESİNDE MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ

Öğr. Gör. Dr. Gülçin ÇETİN KILIÇASLAN

Öğr. Gör. Dr. Osman TÜRKYILMAZ

Öğr. Gör. Dr. Özge KAYGUSUZ İZGÖRDÜ

Prof. Dr. Cihan DARCAN.....	15
-----------------------------	----

BÖLÜM 3

BİTKİ VİRÜSLERİNDE YENİ TEHDİTLER VE KÜRESEL YAYILIM DİNAMİKLERİ

Doç. Dr. Ali KARANFİL

Doç. Dr. Filiz RANDA-ZELYÜT.....	41
----------------------------------	----

BÖLÜM 4

TOPRAK GELİŞİMİNDE MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ

Öğr. Gör. Dr. Özge KAYGUSUZ İZGÖRDÜ

Öğr. Gör. Dr. Osman TÜRKYILMAZ

Öğr. Gör. Dr. Gülçin ÇETİN KILIÇASLAN

Prof. Dr. Cihan DARCAN.....	57
-----------------------------	----

BÖLÜM 5

TOPRAK ISLAHINDA FİTOREMEDİASYON UYGULAMALARINA BAKIŞ

Prof. Dr. Edip AVŞAR.....	85
---------------------------	----

BÖLÜM 6

BİYOKÖMÜR UYGULAMALARININ TOPRAK VE BİTKİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Murat KARAER

Emine TOPÇU

Gülperin DURSUN.....	99
----------------------	----

BÖLÜM 7

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TAHILLAR

Dr. Yusuf Murat KARDEŞ

Prof. Dr. Mahmut KAPLAN

Dr. Beyza ÇİFTÇİ.....115

BÖLÜM 8

KARBON YUTAĞI OLARAK MERALAR

Doç. Dr. Erdem GÜLÜMSER

Prof. Dr. Uğur BAŞARAN.....133

BÖLÜM 9

GÖRÜNTÜ İŞLEME VE DERİN ÖĞRENME TABANLI YABANCI OT YÖNETİMİ: YAPAY ZEKA DESTEKLİ GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Araş. Gör. Cihat GEDİK

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI.....149

BÖLÜM 10

SİSTEMATİKTEN EKOFİZYOLOJİYE BİR DEĞERLENDİRME:

***Ricinus communis* L. ÖRNEĞİ**

Dr. Öğr. Üyesi Nurgül ERGİN.....167

BÖLÜM 11

BRASSICACEAE FAMILYASINDA YER ALAN BAZI MİNÖR

SEBZELER

Doç. Dr. Gamze KAYA.....201

BÖLÜM 12

ELMA (*Malus domestica* L.) ÇEŞİTLERİ ARASINDA ŞEKİL VE BOYUT VARYASYONLARININ MORFOMETRİK ANALİZİ

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI

Arş. Gör. Cihat GEDİK

Dr. Mustafa ÇOMAKLI.....229

BÖLÜM 13

KANSER ARAŞTIRMALARINDA BİTKİ SEKONDER

METABOLİTLERİNİN ROLÜ VE ÖNEMİ

Dr. Hüseyin İZGÖRDÜ.....245

ÖNSÖZ

Bitki bilimi olarak bilinen botanik, bitkilerin sınıflandırılması, yapısı, ekolojisi, fizyolojisi, genetiği ve bitkilerin korunma stratejilerini inceleyen oldukça geniş bir bilim dalıdır. Yaşamın sürdürülmesinde, ekosistemlerin şekillenmesinde ve insan beslenmesinde bitkiler oldukça önemli bir rol oynar. Ekosistemlerde birincil üretici görevini üstlenen bitkiler dünyada diğer canlılar tarafından tüketilen enerjinin de kaynağını oluşturur. Solunum sırasında kullanılan oksijeni sağlamanın yanı sıra besin zincirinin de temelini teşkil eder. Oldukça zengin biyolojik çeşitliliğe sahip olan bitkiler aynı zamanda toprak profilinin düzenlenmesinde, suyun muhafazasında ve iklimsel istikrarın sağlanmasında etkilidir.

Dünya'daki yaşamın temel taşlarından biri olan bitkiler, sesil organizmalar olmaları nedeni ile biyotik ve abiyotik stres faktörlerinden diğer canlılara göre çok daha fazla etkilenmektedirler. Özellikle küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği biyolojik çeşitliliğin azalmasına, tarımsal verimlilik ve ürün kalitesinde kayıplara neden olmaktadır. Özellikle rekombinant DNA teknolojilerinin gelişmesi başta olmak üzere botanik biliminde son yıllarda meydana gelen gelişmeler ile başta insan beslenmesinde kullanılan bitkiler olmak üzere nesli tükenme tehlikesi altında olan türlerin korunması, bozulmuş yaşam alanlarının ıslah edilmesi ve değişen ekolojik koşullar nedeni ile istilacı özellik kazanan türlerin yönetilmesinde önemli stratejiler oluşturulmaktadır.

Botanik bilimi, değişen çevresel koşullar nedeni ile oluşan küresel sorunlara çözümler üretebilen dinamik ve temel bir alandır. İklim değişikliği, ürün kalitesinin azalması, verim ve biyoçeşitlilik kaybı gibi ekolojik olumsuzluklar yaşanmaya devam ederken botanik biliminin sunmuş olduğu güncel bilgi ve yenilikler sürdürülebilir bir dünyanın temin edilmesinde çok önemli olacaktır. Buradan yola çıkarak botanik bilimine farklı bakış açıları sunan ve alanında uzman birçok araştırmacı tarafından hazırlanan bu kitapta botanik bilimindeki güncel bilgiler okuyucuya sunulmuştur. Kitabın biyoloji, ekoloji ve ziraat bilim alanları başta olmak üzere bitki bilimi ile ilgilenen herkese katkı sağlayacağını umuyorum.

Ayrıca alanları ile ilgili derin bilgilerini bizlerle paylaşan bölüm yazarlarımıza ve bu kitabın size ulaşmasını sağlayan IKSAD Yayın Evi'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

Saygılarımla...

Doç. Dr. Sema LEBLEBİCİ¹

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Bilecik, Türkiye. e-mail: sema.leblebici@bilecik.edu.tr
ORCID ID: 0000-0002-3762-6408

BÖLÜM 1

NANOTEKNOLOJİNİN BİTKİ BİYOTEKNOLOJİSİNDEKİ UYGULAMALARI

Doç. Dr. Burcu ÇETİN¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16365533>

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Kütahya, Türkiye. burcu.cetin@dpu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-1465-1464

1.NANOPARTİKÜLLER

Nanopartiküller (NP'ler), en az 100 nm'den küçük, geniş bir malzeme sınıfıdır. Araştırmacılar tarafından boyutun bir maddenin fiziko-kimyasal özelliklerini etkileyebileceğinin bulunmasından sonra önemleri daha iyi anlaşılmıştır (Khan ve ark., 2019).

Sentezlerinin kimyasal yöntemler ile yapılması oldukça maliyetli ve tehlikeli kimyasalların kullanımını gerektirir. Son yıllarda, bitki özütü kullanımına ve sulu çözeltilerde iyonlaştırıcı radyasyon kimyasına dayanan daha yeşil yaklaşımlar geliştirilmiştir (Sanzari ve ark., 2019).

Nanopartiküllerin boyut aralığının birçok yaygın biyomolekül ile benzer olması, bunların hibrit sistemlerde doğal maddeler gibi görünmesini sağlar (West ve ark., 2000). Bu özellikleri sayesinde bitki biyoteknolojisinde önemli olan biyolojik bariyerleri delme yeteneği gösterirler. Küçük boyutları, bitki hücrelerine ve dokularına daha büyük partiküllerden daha kolay girmelerini sağlayarak genlerin, besin maddelerinin ve pestisitlerin hassas bir şekilde iletilmesini sağlar. Ayrıca nanopartiküller, kararlılıklarını, hedefleme yeteneklerini ve bitki sistemleriyle etkileşimlerini artıran belirli yüzey kaplamalarına veya işlevselleştirmeye sahip olacak şekilde tasarlanabilir (Mosqueda-Frómeta ve ark., 2025).

Bu derlemede, nanopartiküllerin bitki biyoteknoloji uygulamalarında kullanımları ile ilgili; gen aktarımı, gen düzenleme, mikrobiyal sterilizasyon, mikroçoğaltım, metabolit üretimi alanlarında yapılmış bitki biyoteknolojisi araştırmalarından bahsedilmiştir. Uygulamalara verilen örneklerde, son yıllarda yapılan ve özgün olanların seçimine dikkat edilmeye çalışılmıştır.

1.1. Nanopartiküllerin Bitki Biyoteknolojisinde Kullanımları

1.1.1.Gen Aktarımında Kullanımları

Bitkilerde genetik manipülasyon, istenen bir özelliği kodlayan ilgi çekici yabancı bir genin bitki hücresine sokulması, RNA interferansı (RNAi) veya nükleaz tabanlı genom düzenlemesi kullanılarak belirli genlerin susturulmasıyla gerçekleştirilir (Rani ve ark., 2025).

Nanopartiküllerin küçük boyutu, biyoyumlu, ayarlanabilir özellikleri ve değişkenliği, onları bitkilerde umut verici biyomoleküler taşıyıcılar haline getirir. En büyük avantajı aktarımın kontrolünün yapılabilmesidir. Ayrıca yapılan çeşitli çalışmalarla, NP'lerin farklı dizaynları ile aktarılanların

korunarak bozunmalarının önleildiği gösterilmiştir. Nanopartikül aracılı gen dönüşüm sistemleri ile geçici ve kararlı dönüşüm verimliliğini teşvik etmek için, model bitki, yaprak, kök veya protoplastların kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır (Wu ve ark., 2023).

Nanopartiküller ile DNA plazmidi, proteini veya bunların bir kombinasyonu aynı anda yapılarak çok yönlü genetik değişim yapılabilir. Aktarımın doğrulanması, genellikle fenotipik zarara neden olmayan floresan mikroskobu, mRNA ve protein seviyelerinin ölçümleri yoluyla yapılan analizlerle gerçekleştirilir. Bu uygulamalarda hibrit nanopartiküller, grafen oksit nanopartiküller, karbon nanotüpler, DNA nanoyapıları, metal nanopartiküller, dendrimerler, kuantum noktaları, peptit bazlı nanopartiküller, nanojeller vd. olmak üzere çeşitli tipte nanopartiküller kullanılmaktadır (Rani ve ark., 2025).

Nanopartiküllerin temel aktarım tekniklerinin geliştirilmesinde önemli katkılarının olduğu görülmektedir. Örneğin gen aktarımında temel metodlardan biri olan biyolistik gen iletiminde kullanılan altın mikrotasıyıcının yerine, gümüş nanopartiküllerin kullanımının bildirildiği çalışmada, gümüş nanopartiküllerin gen dönüşüm ve rejenerasyon verimlerinde önemli ölçüde başarılı sonuçlar elde edilmiş, hatta keşfedilen yeni yaklaşım ile sarf malzemelerin maliyetinde 37,5 kata kadar bir azalma sağlanabileceği bildirilmiştir (Rajkumari ve ark., 2021).

Bir başka çalışmada, tütün hücre süspansiyon hücrelerine, çapı $100 \pm 8,7$ nm olan pozitif yüklü poli-etilenimin kaplı GUS kodlayan plazmit taşıyan mezogözenekli silika nanopartiküller (MSN'ler), ultrason işlemi kullanılarak aktarılmıştır. Farklı süre ve şiddetlerdeki uygulamalardan en iyisinin 640 W olduğu belirlenmiştir (Zolghadrasab ve ark., 2021).

DNA ve RNA'yı sağlam bitkilere etkili bir şekilde ilettiği çeşitli çalışmalarla gösterilmiş olan karbon nanotüpler kullanılarak, tarımsal özellikler üzerindeki etkileri nedeniyle önemli hedeflerden biri olan mitokondrilere bir folat yolu geninin entegrasyonu başarılmış, genotipte kararlı bir dönüşüm ve fenotipte bitkinin büyüme oranında gelişmeler belirlenmiştir. Araştırmacılar tarafından, polimer tabakasının esnekliği gibi özelliklerinin, bitki biyomühendisliğinde geniş uygulamalar için farklı organelleri hedef alan farklı peptitlerin ve kargoların konjugasyonuna da olanak sağlayabileceği bildirilmiştir (Law ve ark., 2022).

Nano-etkinleştirilmiş RNA iletim sistemleri ile RNA moleküllerinin kararlılığı, alımı ve etkinliğini artırılmıştır. Bu uygulamalarda çift sarmallı RNA'yı lipozomlara veya kitosan nanopartiküllerine kapsüllemek gibi nanotaşıyıcı tabanlı stratejiler, çift sarmallı RNA'yı UV radyasyonundan ve RNaz aktivitesinden korunmakta hatta, çift sarmallı RNA'nın 5' veya 3' uçlarını kapatmak gibi terminal modifikasyonlar ile ekzonükleaz bozunmasının önüne geçilmektedir. Bu gelişmeler, tarımsal zararlıları ve patojenleri yönetmek için RNA interferans ve nanoteknolojilerin, özellikle spreyle indüklenen gen susturulması yöntemlerinin yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmıştır (İslam ve ark., 2025).

1.1.2.CRISPR/Cas Gen Düzenlemesindeki Kullanımları

Gen düzenleme, birden fazla kopyanın eklenmesi, istenmeyen genlerin ifadesi ve rastgele bölgelere entegrasyon gibi diğer dönüşüm protokolleriyle ilişkili dezavantajları ortadan kaldırarak transgen içermeyen ürünler üretmek için umut verici bir yol sunmaktadır (Xu ve ark., 2020). CRISPR/Cas-9 genom düzenleme aracının tıp, tarım ve biyoteknoloji dahil olmak üzere birçok alanda çok sayıda uygulaması vardır. Düzenli aralıklarla kümelenmiş kısa palindromik tekrar (CRISPR) ve ilişkili proteinleri (Cas-9), tüm canlı hücrelerde en etkili, verimli ve doğru genom düzenleme aracıdır ve birçok uygulamalı disiplinde kullanılır. Kılavuz RNA (gRNA) ve CRISPR ilişkili (Cas-9) proteinleri, CRISPR/Cas-9 sisteminin iki temel bileşenidir. CRISPR/Cas-9 genom düzenleme mekanizması üç adımdan oluşur: tanıma, kesme ve onarım. Tasarlanan sgRNA, tamamlayıcı bir baz çifti aracılığıyla ilgili gendeki hedef diziyi tanıır. Cas-9 nükleazı, protospacer bitişik motifinin 3. baz çifti yukarısında çift sarmallı kırıklar oluştururken, çift sarmallı kırıklar homolog olmayan uç birleştirme veya homoloji yönlendirmeli onarım hücresel mekanizmalarıyla onarılır (Asmamaw ve Zawdie, 2021).

Örneğin, Cas9 nickaz ve insan APOBEC3A'dan (A3A-PBE) oluşan bir baz düzenleyici füzyon proteininin, dizi bağlamından bağımsız olarak, tüm incelenen bölgelerde 17-nükleotid düzenleme penceresiyle buğday, pirinç ve patatesta sitidini timidine verimli bir şekilde dönüştürdüğü saptanmış ve genom mühendisliği yoluyla mahsulleri iyileştirmek için umut verici bir araç olduğu bildirilmiştir (Zong ve ark., 2018).

1.1.3.Yüzey Dezenfeksiyonunda Kullanımları

Bitki *in vitro* çalışmaları steril koşullarda yürütülmelidir. Bu nedenle kültüre alınacak eksplantların steril edilmesi gerekir. Metal ve metal oksit NP'lerinin çeşitli mikroorganizmalar üzerindeki öldürücü etkilerinin belirlenmesinden sonra *in vitro* çalışmalarda sterilizasyon amacı ile kullanımlarının potansiyelleri ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır.

Chrysanthemum morifolium Ramat cv. Jimba bitkisinin yapraklarına yüzey sterilizasyonu için 15 ila 20 dakika boyunca 250 ppm AgNP uygulaması yapılması ve eksplantların 4 ppm AgNP içeren Murashige ve Skoog ortamında kültürlü alınması işlemlerinden sonra %100 steril ortam başarısı sağlanmıştır. Ayrıca, nanopartikül içeren ortamda kültüre alınan krizanem bitkicikleri, otoklavlanmış ortamdaki bitkiciklere kıyasla askorbat, peroksidad ve süperoksit dismutaz enzimleri açısından daha yüksek antioksidan enzim aktiviteleri göstermiştir (Tung ve ark., 2021).

Bakır nanopartiküllerinin (CuNP'ler) cıva klorür ($HgCl_2$) veya kalsiyum hipoklorit ($Ca(ClO)_2$) gibi yaygın dezenfektanların yerini alarak eksvitro yumruğu begonyaların (*Begonia \times tuberhybrida* Voss) farklı eksplantlarında (yaprak sapları, çiçek salkımı ve gövde düğümleri) sterilizasyon etkinliği araştırılmıştır. Sonuçlar, CuNP'lerin $HgCl_2$ ve $Ca(ClO)_2$ 'nin yerini alabileceğini ve P, F ve S eksplantlarının yüzey dezenfeksiyonunda etkili olduğunu göstermiştir. CuNP'ler, $HgCl_2$ ve $Ca(ClO)_2$ 'ye kıyasla, muamele edilen eksplantların embriyonik kallus ve somatik embriyogenezini arttırmıştır (Bao ve ark., 2022).

Endofitik kontaminasyonu kontrol etmek için farklı konsantrasyonlarda çinko oksit (ZnO) ve gümüş (Ag) nanopartiküllerin kullanıldığı çalışmada. Her iki nanopartikül de endofitik kontaminasyonu kontrol etmede ümit verici sonuçlar göstermiştir. Ancak ortamın ek bir bileşeni olarak sterilizasyon ajanları olarak ZnO ve Ag nanopartiküllerin eklenmesinin kontaminasyonu başarıyla ortadan kaldırmakla birlikte, muz doku kültüründe doku ölümüne neden olduğunun saptandığı bildirilmiştir (Nazir ve ark.,2024).

1.1.4. Mikroçoğaltımda Kullanımları

NP'ler, özellikle büyüme uyarımı ve klonal mikroçoğaltım ile elde edilen bitkilerin korunması için çeşitli alanlarda uygulama için potansiyel bir ajan haline getiren benzersiz özelliklere sahiptir.

Karbon nanotüplerin, ananas çoğalması ve köklenme aşamaları üzerindeki etkilerini incelemek için 0,0, 0,2, 0,02 ve 0,002 g/l dozlarında yapılan uygulamalarda, en yüksek sürgün sayısı 2 g/l karbon nanotüp uygulamasında elde edilmiştir. Köklenme aşamasında tüm bitki parametrelerinin, karbon nanotüp uygulamalarında önemli ölçüde iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Taha ve ark., 2025).

Salix fragilis'in mikroçoğaltım protokolünün araştırıldığı çalışmada WPM besin ortamına 3 µg/L konsantrasyonda ilave edilen küresel şekilli (20-40 nm) Ag nanopartiküllerinin ve flokülan morfolojili CuONP'nün (çap 50 ila 200 nm, kalınlık 10-20 nm) steril mikrokolonların sayısını %100'e çıkardığı ve sürgün yüksekliğini de %27 arttırdığı bildirilmiştir (Chebotaryova ve ark., 2024).

Kore'de yetiştirilen *Rosa hybrida* 'Sahara' için yapılan *in vitro* çalışmalarda gümüş nitrat (AgNO₃) ve gümüş nanopartiküllerin (AgNP'ler), etkileri araştırılmıştır. Ortama AgNP'ler ve AgNO₃ eklenmesinin aşırı hidrasyonu ve klorozu azalttığı, taze ağırlık ve büyüme parametrelerinde artışı desteklediği saptanmıştır. AgNP'lerin kültür işlemlerinde en büyük problem olan etilen üretimiyle ilgili zorlukları azaltarak gül doku kültüründeki bitkiciklerin kalitesini artırmak için uygun olduğu belirlenmiştir (Shin ve ark., 2024).

1.1.5. Sekonder Metabolit Üretiminde Kullanımları

Nanopartiküller bitki sekonder metabolitlerinin biyosentez ve birikim sürecini etkileyebilir. Hücrede sinyal molekülleri olarak hareket ederler ve etkileri gen ifadesi, metabolik yollar, bitki enzim aktivitesi, besin alımı ve bitki büyüme uyarımını değiştirme ve sekonder metabolitlerin düzenlenmesi, oluşumu ve çıkışıyla gözlenir.

Artemisia absinthium L., tıbbi bitkisinin kallus kültürlerinin yeşil sentez ile üretilmiş NP'lerle (Ag ve Cu) desteklendiği uygulamalar sonucunda biyokütle birikimi, enzimatik olmayan bileşikler, antioksidan enzimleri ve antioksidan aktivite metabolitlerinin sentezinde önemli oranlarda artışlar belirlenmiştir (Hayat ve ark., 2021).

MS besin ortamına ilave edilen silikon dioksit ve gümüş nanopartiküllerin *Lavandula officinalis* uçucu yağ bileşimlerinde olumlu farklılıklar oluşturduğu ve bitki ekstraktlarının *Escherichia coli* ve

Staphylococcus aureus'a karşı yüksek antimikrobiyal aktiviteler gösterdiği belirlenmiştir (Khattab ve ark., 2022).

FeO-NP'ler, üstün fizyolojik ve biyokimyasal etkiler sağlayarak geleneksel Fe tuzu kullanımından daha iyi sonuçlar gösterir. Ek olarak, FeO-NP'ler kallus kontaminasyonunu kontrol etmeye ve hızlı kallus rejenerasyonunu desteklemeye yardımcı olur. *Oryza sativa* ile kallus kültürü çalışmalarında MS ortama 15 ppm eklenen FeO-NP'lerinin, kallus kontaminasyonunu önemli ölçüde (%80) kontrol ettiği belirlenmiştir. FeCl₃ bazlı FeO-NP'lerin hızlı kallus indüksiyonunu (%72) ve rejenerasyonunu (%43) indüklediğini, buna karşılık FeSO₄ bazlı FeO-NP'lerin kallus ağırlığında (%516), çapında (%300), sürgün sayısında (%200) ve köklerde (%114) artışa neden olduğu saptanmıştır. Ayrıca FeO-NP'lerin Fe kaynağı olarak kullanıldığı modifiye ortamlar, normal MS ortamlarına kıyasla hızlı kallus oluşumunu ve rejenerasyonu indüklemiştir (Ullah ve ark, 2024).

1.1.6. Nanobiyosensör Olarak Kullanımları

Biyosensörler kimyasal sensörlerin bir alt sınıfıdır, bir dönüştürücüye (yarı iletken malzeme) kimyasal veya fiziksel olarak bağlanabilen hassas bir biyolojik katmana (antikor, enzim, protein veya canlı bir biyolojik sistem) sahiptir ve ölçülebilir bir sinyal üretir. Bir mikrodenetleyici ve bir sinyal koşullandırma devresinin yardımıyla, bir dönüştürücüden gelen çıkış sinyali dijitalleştirilebilir ve gerçek zamanlı olarak bir ekran monitöründe gösterilebilir. Transdüserler ve reseptörler gibi temel parçalarının özelliklerine dayanarak, biyosensörler birkaç kategoriye ayrılabilir. Algılama teknolojilerine göre kategorize edildiklerinde dört kategoriye ayrılırlar: elektrometreler, yüzey plazma rezonans biyosensörleri, çip üzerindeki biyosensörler ve nanobiyosensörler. En yaygın biyoreseptör tipleri, nükleik asit (iki tamamlayıcı iplik), hücresel (mikroorganizmalar, proteinler), antikor ve antijen, enzim substratı ve biyomimetik veya sentetik reseptörler arasındaki etkileşimlere dayananlardır. Nanobiyosensörler, hassas tarım, bitki fizyolojisinin izlenmesi ve yönetimi, bitkilerdeki pestisit kalıntılarının tespiti, patojen tespiti ve hastalık yönetimi, biyogüvenlik ve GDO tespiti, çevresel izleme, kalite kontrolü için yenilikçi paketleme ve çevresel stres tespiti dahil olmak üzere çeşitli tarımsal uygulamalarda kullanılabilir (Kumar ve ark., 2025).

Gen aktarımı çalışmalarında, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$ çekirdek/kabuk nanopartiküllerin genetik olarak değiştirilmiş mahsullerin hızlı tespiti için çok hassas ve kullanışlı bir floresan nanobiyosensörü geliştirilmiştir (Dadmehr ve ark., 2015).

Atropa belladonna'nın doğal ve transgenik tüylü kök özütlerinde antikolinerjik ajanlar olarak tropan alkaloidlerini tespit etmek için hassas, seçici ve hızlı bir optik nanobiyosensör tasarlanmıştır (Bagheri ve ark., 2017).

Bitki hücrelerinde yerinde miRNA tespiti için nanomalzemeler ve moleküler işaretler kullanarak floresan nanosensörü başarıyla geliştirilmiştir. Moleküler işaretler, 15 nm altın nanopartiküllere yüklenerek, bunları DNase I bozunmasından etkili bir şekilde korunan, 1,0 nM'lik bir tespit limiti ile dikkate değer bir özgüllük ve tespit yeteneği sergileyen, miRNA sinyallerini floresan sinyallerine verimli bir şekilde dönüştüren, bitkilerde miRNA'nın mekansal ve zamansal dağılımına ilişkin değerli bilgiler sağlar. Daha doğru bir tespit elde etmek için, tasarlanan nanosensörün tespit limitinin daha da iyileştirilmesi gerekse de, bu tekniğin, bitkilerdeki mekanizmaları ve düzenlemeyi incelemek için güçlü bir araç görevi gören kullanışlı ve etkili bir yaklaşım sunduğu bildirilmektedir (Chen vd., 2024).

Bu derlemede sunulan bitki biyoteknolojisinde nanopartiküllerin kullanımları ile ilgili araştırmaların sonuçları bizlere ileride yapılabilecek çok daha heyecan verici yeni tekniklerin müjdesini veriyor. Çözülmesi gereken problemlerin, teknolojinin son yüzyılda hızla gelişmesi ile beklenenden çok daha hızlı çözüleceği aşikar. Yeni buluşların insanlığın refah içerisinde yaşamasına imkan vermesi dilekleri ile..

KAYNAKÇA

- Asmamaw, M., & Zawdie, B. (2021). Mechanism and applications of CRISPR/Cas-9-mediated genome editing. *Biologics: targets and therapy*, 353-361.
- Bagheri, F., Piri, K., Mohsenifar, A., & Ghaderi, S. (2017). FRET-based nanobiosensor for detection of scopolamine in hairy root extraction of *Atropa belladonna*. *Talanta*, 164, 593-600.
- Bao, H. G., Tung, H. T., Van, H. T., Bien, L. T., Khai, H. D., Mai, N. T. N., ... & Nhut, D. T. (2022). Copper nanoparticles enhanced surface disinfection, induction and maturation of somatic embryos in tuberous begonias (*Begonia* × *tuberhybrida* Voss) cultured in vitro. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 151(2), 385-399.
- Chebortaryova, S. P., Zakharova, O. V., Gusev, A. A., Grigoriev, G. V., Baranchikov, P. A., & Strekalova, N. S. (2024). Application of Silver and Copper Oxide Nanoparticles As Growth Stimulants for Willow Plants Obtained by the Method of Clonal Micropropagation. *Nanobiotechnology Reports*, 19(5), 667-674.
- Chen, L., Hu, G., Cui, B., Gao, J., Gu, X., Cui, H., & Zeng, Z. (2024). Development of a stable and efficient fluorescence nanosensor for in situ detection of MicroRNA in plant. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 404, 135244.
- Dadmehr, M., Hosseini, S. M., & Korouzhdehi, B. (2015). Design and fabrication of fluorescence based nanobiosensor for detection of transgenic plants. *Crop Biotechnology*, 5(1), 29-36.
- Hayat, K., Ali, S., Ullah, S., Fu, Y., & Hussain, M. (2021). Green synthesized silver and copper nanoparticles induced changes in biomass parameters, secondary metabolites production, and antioxidant activity in callus cultures of *Artemisia absinthium* L. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 61-72.
- Islam, M. S., Ahmed, M. R., Noman, M., Zhang, Z., Wang, J., Lu, Z., ... & Wang, J. (2025). Integrating RNA interference and nanotechnology: A transformative approach in plant protection. *Plants*, 14(6), 977.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12(7), 908-931

- Khattab, S., El Sherif, F., AlDayel, M., Yap, Y. K., Meligy, A., & Ibrahim, H. I. M. (2022). Silicon dioxide and silver nanoparticles elicit antimicrobial secondary metabolites while enhancing growth and multiplication of *Lavandula officinalis* in-vitro plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 149(1), 411-421.
- Kumar, P., Chugh, P., Ali, S. S., Chawla, W., Sushmita, S., Kumar, R., ... & Kumar, R. (2025). Trends of nanobiosensors in modern agriculture systems. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 197(1), 667-690.
- Law, S. S. Y., Liou, G., Nagai, Y., Giménez-Dejor, J., Tateishi, A., Tsuchiya, K., ... & Numata, K. (2022). Polymer-coated carbon nanotube hybrids with functional peptides for gene delivery into plant mitochondria. *Nature communications*, 13(1), 2417.
- Mosqueda-Frómata, O., Andujar, I., Mosqueda-Rodríguez, G. M., Pestryakov, A., Companioni, B., Tapia y Figueroa, M. D. L., ... & Lorenzo, J. C. (2025). Mini-review: Application of nanoparticles in plant biotechnology and agriculture. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 1-5.
- Nazir, K., Hassan, S. W., Khan, M. I., Elamin, K. M. A., & Niyazi, H. A. (2024). The use of ZnO NPs and Ag NPs along with sterilizing agents for managing contamination in banana tissue culture. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(23), 30297-30304.
- Rani, N., Kumari, K., & Hooda, V. (2025). The role of nanoparticles in transforming plant genetic engineering: advancements, challenges and future prospects. *Funct Integr Genomics*, 25, 23.
- Rajkumari, N., Alex, S., Soni, K. B., Anith, K. N., Viji, M. M., & Kiran, A. G. (2021). Silver nanoparticles for biolistic transformation in *Nicotiana tabacum* L. *3 Biotech*, 11, 1-7.
- Sanzari, I., Leone, A., & Ambrosone, A. (2019). Nanotechnology in plant science: to make a long story short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 120.
- Shin, J. W., Kim, S., Choi, J. H., & Kim, C. K. (2024). Effect of silver nanoparticles and antioxidants on micropropagation of *Rosa hybrida* 'Sahara' via nodal culture. *Journal of Plant Biotechnology*, 51(1), 219-226.

- Taha, R. A., Gaafar, A. A., Abou-Baker, N., Zayed, N. S., & Shaaban, E. A. (2025). Nano carbon application for pineapple (*Ananas comosus* L.) micropropagation, secondary metabolites production and potential scavenging activity. *Egyptian Journal of Botany*, 65(1), 34-42.
- Tung, H. T., Bao, H. G., Cuong, D. M., Ngan, H. T. M., Hien, V. T., Luan, V. Q., ... & Nhut, D. T. (2021). Silver nanoparticles as the sterilant in large-scale micropropagation of chrysanthemum. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 1-10.
- Ullah, J., Gul, A., Khan, I., Shehzad, J., Kausar, R., Ahmed, M. S., ... & Mustafa, G. (2024). Green synthesized iron oxide nanoparticles as a potential regulator of callus growth, plant physiology, antioxidative and microbial contamination in *Oryza sativa* L. *BMC Plant Biology*, 24(1), 939.
- Xu, Y., & Li, Z. (2020). CRISPR-Cas systems: Overview, innovations and applications in human disease research and gene therapy. *Computational and structural biotechnology journal*, 18, 2401-2415.
- West, J. L., & Halas, N. J. (2000). Applications of nanotechnology to biotechnology: Commentary. *Current opinion in Biotechnology*, 11(2), 215-217.
- Wu, K., Xu, C., Li, T., Ma, H., Gong, J., Li, X., ... & Hu, X. (2023). Application of nanotechnology in plant genetic engineering. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19), 14836.
- Zolghadrnasab, M., Mousavi, A., Farmany, A., & Arpanaei, A. (2021). Ultrasound-mediated gene delivery into suspended plant cells using polyethyleneimine-coated mesoporous silica nanoparticles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105507.
- Zong, Y., Song, Q., Li, C., Jin, S., Zhang, D., Wang, Y., ... & Gao, C. (2018). Efficient C-to-T base editing in plants using a fusion of nCas9 and human APOBEC3A. *Nature Biotechnology*, 36(10), 950-953.

BÖLÜM 2

BİTKİ BESLENMESİNDE MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ

Öğr. Gör. Dr. Gülçin ÇETİN KILIÇASLAN^{1*},
Öğr. Gör. Dr. Osman TÜRKYILMAZ²,
Öğr. Gör. Dr. Özge KAYGUSUZ İZGÖRDÜ³,
Prof. Dr. Cihan DARCAN⁴,

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16367058>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye. gulcin.cetin@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar),
Orcid ID: 0000-0002-9625-224X

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye. osman.turkyilmaz@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0002-3152-9439

³ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye. ozge.kaygusuz@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0002-3652-4266

⁴ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Bilecik, Türkiye. cihan.darcen@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0003-0205-3774

GİRİŞ

Bitkiler büyüme, gelişme ve üreme süreçlerini devam ettirebilmek için çeşitli besin maddelerine gereksinim duymaktadır ve bu temel ihtiyaçlar bitki beslenmesi alanının odak noktasını oluşturmaktadır. Bitkilerin bu besinlere ulaşması ve onları kullanabilmeleri çevreleriyle kurdukları karmaşık ilişkiler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, besin döngüsü olarak adlandırılan süreçler bitkiler için hayati öneme sahip elementlerin sürekli olarak kullanılabilirliğini sağlayarak ekosistemlerin sağlığı ve üretkenliği için vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Mikroorganizmalar ise bu besin döngülerinin işleyişinin merkezinde yer alır ve bitki beslenmesi üzerinde doğrudan ve dolaylı etkilere sahiptir.

Bitkiler ve mikroorganizmalar arasındaki etkileşim, tek yönlü bir süreç olmaktan ziyade bir ekosistem içerisinde gerçekleşen karmaşık bir ilişki ağını oluşturmaktadır. Bitki ilişkili mikroorganizmalar iki guruba ayrılabilir. Bunlardan birisi toprak mikrobiyotası iken diğeri bitki mikrobiyotası olarak adlandırılan, bitki içinde ve üzerinde yaşayan mikroorganizma topluluğudur (Suman vd., 2022). Bitki köklerini çevreleyen ve rizosfer olarak adlandırılan toprak bölgesinde bitki-mikroorganizma ilişkisi yoğun bir şekilde gerçekleşmektedir. Bitkiler kökleri aracılığıyla organik bileşikler (sekerler, amino asitler, organik asitler ve enzimler gibi) salgılayarak çevrelerindeki mikroorganizmaların yapısını ve aktivitesini etkilerler. Bu bileşikler mikroorganizmalar için bir besin kaynağı oluşturarak rizosferde özelleşmiş mikrobiyal toplulukların oluşmasına katkıda bulunur (Yetgin, 2023). Mikroorganizmalar bu şekilde besin ihtiyacını karşılarken besin döngüsü, organik maddelerin ayrışması, stres toleransı ve besin maddelerinin çözünür hale gelmesi gibi birçok süreçle bitki büyümesine katkıda bulunur. Bitki mikrobiyotası ise bitki sağlığı ve işlevi için hayati bir rol oynar. Bu mikroorganizmalar patojenlere karşı biyolojik kontrol ajanı olarak işlev göstererek bitki hastalıklarının baskılanmasına yardımcı olur ve bitkinin bağışıklık sistemini uyarabilir. Bunun yanı sıra, bitki büyümesini teşvik eden hormonlar (örneğin oksinler, giberellinler) üreterek kök gelişimini, çiçeklenmeyi ve genel biyokütle artışını destekler (Hanif vd., 2024).

Bu kitap bölümünün temel amacı, mikroorganizmaların bitki beslenmesindeki çok yönlü etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu bağlamda, mikroorganizmaların bitkilerle olan karşılıklı ilişkileri, bitki

beslenmesine katkıda bulundukları çeşitli doğrudan ve dolaylı mekanizmalar, bu süreçlerde önemli rol oynayan başlıca mikroorganizma grupları ve bu etkileşimlerin sürdürülebilir tarım uygulamalarındaki potansiyeli detaylı olarak elemlacaktır.

1. MİKROORGANİZMALARIN BESİN ELEMENTLERİNİ DÖNÜŞTÜRME YETENEKLERİ

Toprak mikroorganizmaları, toprak verimliliğini artırmanın yanı sıra yaşam için temel olan besin döngülerinde de önemli rol oynarlar (Yadav vd., 2021). Bir gram toprakta milyarlarca mikroorganizma bulunabilir. Topraktaki en çok mikroorganizmalar sırasıyla bakteriler, mantarlar, aktinomisetler ve alglerdir. (Mondal vd., 2020; Singh vd., 2020; Yadav vd., 2018). Aslında topraktaki mikrobiyal aktivitenin genel ölçümleri organik maddenin parçalanmasıyla eş anlamlıdır. Organik maddenin ayrışması genellikle heterotrofik mikroorganizmalar tarafından kontrol edilir ve besin maddelerinin (özellikle azot (N), kükürt (S) ve fosfor (P)) salınmasına ve döngüsüne yol açar. Mikroorganizmalar ayrıca hücrelerinde önemli miktarda karbon (C) ve diğer besin maddelerini depolar. Bu nedenle, yaşayan mikroorganizmaların toplam kütlesi (mikrobiyal biyokütle) topraktaki enerji ve besin maddelerinin dönüşümlerinin kaynağı, deposu ve düzenleyicisi olarak merkezi bir role sahiptir (Murphy vd., 2007).

Toprak mikrobiyal topluluğu, bitkilerin yararlanabileceği C ve N miktarını artırabilir veya azaltabilir (Bhattacharyya vd., 2022). Bu, (i) bileşimlerine ve toprak fizikokimyasal özelliklerine (Cui vd., 2020) (ii) C ve N'nin biyoyararlanımına yol açan bozunma yollarındaki farklılıklara (Zhang vd., 2014) bağlıdır. Tarım topraklarında, toprak organik madde oluşumu (TOM) ve toprak C - N döngüsü, çöp ayrışmasına ve toprak mikroorganizmaları tarafından dönüştürülmesine bağlıdır ve bu da mikrobiyal besin (C ve N) kullanım verimliliğini etkiler (Cotrufo vd., 2013).

Farklı toprak mikroorganizmalarının metabolik aktiviteleri toprak C'yi (C fiksasyonu, bozunma, metabolizma) ve N döngüsü yollarını (N fiksasyonu, nitrifikasyon, denitrifikasyon) belirler (Kuyppers vd., 2018) ve bu yollardaki değişim, toprak mikrobiyal topluluk bileşiminde besin girdisinin neden olduğu değişikliklere bağlıdır (Yu vd., 2020). Wang ve arkadaşları, toprak neminin, uygun veya stres koşullarını teşvik ederek toprak mikroorganizmalarının

morfolojisi ve fizyolojisini etkileyerek C ve N döngüsünde önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Wang vd., 2017). Ek olarak, toprak nemi hem toprak organik maddesinde hem de mikrobiyal biyokütlerde C:N oranının belirleyicisi olarak işlev görür. Cui ve arkadaşları, bitki örtüsünün neden olduğu toprak nemi ve karbon-besin stokiyometrisindeki değişikliklerin mikrobiyal metabolik özellikleri düzenlediğini ve böylece yarı kurak bölgelerde toprak besin bulunabilirliğini ve mikrobiyal biyokütleyi etkilediğini bildirmiştir (Cui vd., 2020). Waring ve arkadaşları, C-sınırlı koşullar altında toprak C:N oranını değiştirmenin hem mantar hem de bakterilerin göreceli bolluğunu değiştirmek için uygulanabilir bir seçenek olmayabileceğini öngörmüştür (Waring vd., 2013). Bununla birlikte, N eksik olduğunda, C'ye göre N bulunabilirliğini artırmak mantar baskınlığını destekleyebilir. Mantar-bakteriyel (M:B) oranları mikrobiyal biyokütle devir oranlarındaki değişikliklerden etkilenebilir. Örneğin, bir substrattaki ara bir C:N oranı, mantar N mineralizasyonu nedeniyle bakteri büyümesini hızlandırır, böylece toplam mikrobiyal biyokütleyi artırır ve net N mineralizasyonunu azaltır. Yine, Mooshammer ve diğerleri, toprak N eksik olduğunda mikroorganizmaların mevcut N'nin çoğunu bağladığını ve bunun da N mineralizasyonunun azalmasına yol açtığını göstermiştir (Mooshammer vd., 2014).

Toprak mikroorganizmaları toprak P bulunabilirliğini ve döngüsünü ve mikrobiyal P dönüşümünü düzenler (Dai vd., 2020). Mikrobiyal P dönüşümü, topraktaki farklı P formlarının modifikasyonuna yol açan organik P'nin mineralizasyonunu ve immobilizasyonunu içerir (Wang vd., 2022).

Metagenomik yoluyla mikrobiyal işlevsel profillemeye, P'nin uzun süreli uygulanmasının inorganik P'nin organik P'ye dönüşümünü artırabileceğini ve bunun da toprak mikroorganizmaları tarafından emilmesini sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Bu süreç, fosfat taşıyıcı genindeki (*pit*) artış ve P-açlık tepkisi genindeki (*phoR*) azalma ile kolaylaştırılır (Dai vd., 2020). Bu, toprak mikroorganizmalarının harici P kaynaklarını kullanma konusunda isteksiz olduğunu göstermektedir (Eder vd., 1996). Güney Çin'deki ekolojik restorasyon, glikoz dehidrogenaz (*gcd*) genlerinin sentezini artırarak toprak P çözünürlüğünün artmasına yol açmıştır (Liang vd., 2020). Kuzey Çin'deki tipik ılıman bir çayırda P girişi, mikrobiyal N'ye erişimi zayıflattı, yaşam stratejilerini K-stratejisinden (*Acidobacteria*, *Chloroflexi* türleri baskın) r-stratejisine (*Proteobacteria*, *Bacteroidetes* türleri baskın) değiştirdi ve işlevsel

özelliklerini değiştirdi (Shi vd., 2022). Uzun vadeli N ilavesi, P-çözücü bakterilerin (örneğin *Actinobacter*, *Gammaproteobacteria* ve *Alphaproteobacteria*) sayısal olarak azaltabilir (Dai vd., 2020). Sera sebze tarlalarında organik gübrenin uzun süreli uygulanması, toprak ve biyoyararlanımlı P, mikrobiyal (mantar ve bakteri) biyokütle P ve toprak fosfataz (alkali ve asit fosfomonoesteraz, fosfodiesteraz ve fitaz) aktivitelerini artırabilir (Zhang vd., 2022). Benzer şekilde, Luo ve diğerleri, bir meta-analizde organik katkıların asit ve alkali fosfataz aktivitelerini sırasıyla %22 ve %53 oranında artırabileceğini (Luo vd., 2019), mikrobiyal ekstraselüler fosfataz enziminde buna karşılık gelen bir artışla birlikte topraklarda organik P'nin inorganik P'ye dönüşümünün ve *phoD* ve *phoC* barındıran türlerin artmasına yol açabileceğini gösterdi (Wang vd., 2019).

Toprak potasyumunun (K) farklı formları tanımlanmıştır, örneğin yapısal K, değiştirilebilir K, değiştirilemeyen K ve toprak çözeltisi K/suda çözünür K (Lalitha ve Dhakshinamoorthy, 2014). Çalışmalar, farklı tarımsal uygulamaların topraktaki bu farklı K formlarını (Dong vd., 2019; Zhang vd., 2020), K salgılayan toprak bakteri topluluklarının bolluğunu, çeşitliliğini ve büyümesini etkileyerek artırabileceğini veya azaltabileceğini göstermiştir (Zhang vd., 2020; Xia vd., 2022). Örneğin, biyokömür ilavesi, K-çözücü bakterilerin (KSB) büyümesini destekleyerek (Liu vd., 2017), toprak değiştirilebilir K'yi ve toprak çözeltisi K'yi sırasıyla %30 ve %11 oranında artırabilirken (Zhang vd., 2020), Dong ve diğerleri (Dong vd., 2019), tarımsal faaliyetlerin KSB'nin (örn. *Enterobacter*) işlevselliğini azaltabileceğini ileri sürmüştür. Orman toprağındaki KSB, plantasyon toprağındakinden (örn. kauçuk) daha çeşitlidir; bu da K döngüsünün orman toprağında çok daha yaygın olduğunu ve bu iki toprak türündeki çözünür K içeriklerindeki farklılıklara yol açtığını gösterir (Dong vd., 2019). Bu, KSB'nin çözünmeyen K'yi bitkiler tarafından alınabilen çözünür K+'ya dönüştürmek için organik asitler (glukonik/asetik asitler) veya belirli hücre dışı maddeler salabilmesine bağlanabilir (K-çözücü bakteri (örn., *Bacillus mucilaginosus* (Xiao vd., 2012), *Pseudomonas sp.* (Sarikhani vd., 2018)) ve mantar türlerinin (örn., *Penicillium purpurogenum* (Song vd., 2015), *Cenococcum geophilum* Fr (Xue vd., 2019)) (Melero vd., 2008; Xiao vd., 2012; Nutaratat vd., 2017). Örneğin, *Enterobacter*, K içeren bir mineral olan feldispatı çözebilir (Yuan vd., 2015).

Bu çalışmalar, KSB'nin toprak biyolojik verimliliğini artırmak için kullanılabileceğini göstermektedir (Dong vd., 2019).

2. MİKROBİYAL HÜMİK VE FULVİK ASİT ÜRETİMİ

Toprak organik karbonu sıklıkla toprak kalitesinin ve tarımın uygulanabilirliğinin kritik bir belirleyicisi olarak gösterilir (Bhatt ve Singh, 2022). Organik madde oranını yükselterek toprağı periyodik olarak yenilemek esastır (Liu vd. 2006). Organik materyalden humus üretimi süreçte kritik bir adımdır. Humus veya daha kesin olarak humik madde (HS), çeşitli ortamlarda yaygın olarak bulunan iyi bilinen, heterojen, yüksek moleküler ağırlıklı (1000–30.000) bir organik maddedir. (Ghabbour ve Davies, 2014; Myneni vd., 1999).

Hümik maddeler (HS), lignin, tanen, selüloz ve kütinler gibi ayrıışmış bitki ve hayvan materyallerinin kalıntılarıdır. (Tan vd., 2000; Billingham, 2012; Hayes ve Swift, 2020). HS'ler, sudaki çözünürlüğe göre humin (HM) (ne alkalide ne de asitte çözünür), humik asit (HA) (sadece alkali koşullarda suda çözünür) ve fulvik asit (FA) (tüm pH koşullarında suda çözünür) olarak alt gruplara ayrılır (Schnitzer, 1978; De Melo vd., 2016). HS'deki humin fraksiyonunun bozunmayan yapısı nedeniyle araştırmacılar, kısa zaman dilimlerinde toprak verimliliğini ve sağlığını iyileştirebildikleri için HA ve FA fraksiyonlarına odaklanmışlardır (Ampong vd., 2022). HS'nin HA ve FA fraksiyonları kimyasal olarak reaktiftir ve mikrobiyal reaksiyonlara direnebilir, böylece toprak ve bitkilerde yararlı roller üstlenirler. (Billingham, 2012). HA ve FA fraksiyonları doğada ayrışabilir olmasına rağmen, parçalanmaları yavaştır ve toprağı sürekli bir C tedariki ile sonuçlanır. Sible vd., (2021) tarafından yapılan incelemede, HA, FA ile karşılaştırıldığında yüksek miktarda C içerir. Bu, HA uygulamasının toprak mikroorganizmalarına toprak biyolojik aktiviteleri için gerekli olan ek C sağlayabileceğini göstermektedir (Ampong vd., 2022).

HA'nın uzun süreler boyunca bozunmaya dayanma yeteneğı ve amfifilik özellikleri, kompleks katyonlar oluşturmalarını sağlar. (Wood, 1996). HA fraksiyonu, toprak mikroorganizmalarının büyümesinde önemli bir rol oynayan yaklaşık %60 organik karbon (C) içerir. (Sible vd., 2021). HA, C'ye ek olarak %4-6 azot (N), %0,2-1 fosfor (P) içerir ve diğer mikro besin maddeleri de çok az miktarda bulundurur (Haworth, 1971).

HA'nın işlevleri, kaynağa bağlı olan yapılarıyla ilişkilidir. (Rupiasih, 2005; Garcíá vd., 2016; Garcíá vd., 2019; Nardi vd., 2021; van Tol de Castro vd., 2021). HA yapısı birçok işlevsel grup içermesine rağmen, en baskın olanlar fenolik (OH) ve karboksilik (COOH) gruplarıdır (Nardi vd., 2021). COOH ve OH işlevsel grupları, toprak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra bitki büyümesini iyileştirmek gibi HA işlevlerinden esas olarak sorumludur (De Melo vd., 2016; Nardi vd., 2021). Bu işlevsel grupların ayrışması, sırasıyla hidrofilik ve hidrofobik kısımlar olan polar ve polar olmayan uçlar oluşturur (Mirza vd., 2011); her iki uç da yararlı HA işlevleri kazandıran mekanizmalarda rol oynar. Hidrofilik uç öncelikli olarak şelat oluşturma işlevlerinde rol oynarken, hidrofobik uç itici amaçlarla bağlantılıdır (Billingham, 2012). Mikro besinleri şelatlayarak ve bitkilere birlikte taşıyarak toprak besin maddelerinin, özellikle mikro besinlerin bulunabilirliğini artırmaktadır (Yang vd., 2021). OH ve COOH grupları ayrıştığında, anyonik kısmın polar ucu topraktaki elektrostatik bağlanma yoluyla katyonik metallerle kompleksler oluşturur ve böylece bu metalleri toprakta tutar. Toksik ağır metallerin çökeltilerek taşınmasını azaltır ve böylece bitkiler tarafından toksik ağır metal alımını azaltmaktadır (Wu vd., 2017). Aynı zamanda suyu seven hidrofilik kısım, toprak su tutma kapasitesini (WHC) artıran misel oluşturur. Öte yandan, polar olmayan uç su moleküllerini iterek su infiltrasyonunu azaltır ve kil agregat stabilitesini iyileştirir (Billingham, 2012). van Tol de Castro vd., (2021) tarafından yakın zamanda yapılan bir çalışma, HA'nın aromatik ve alifatik fonksiyonel gruplarının N alımını ve çözünür şekerleri artırmaktan sorumlu olduğunu ve bunun pirinçte karşılık gelen bir verim artışıyla sonuçlandığını bildirmektedir; bu arada Garcíá ve ark. (2016) tarafından daha önce yapılan bir bulgu, HS alifatik ve aromatik fonksiyonel gruplarının pirinç fidelerinde kök büyümesini uyardığını göstermiştir.

Hüyük asit uygulamasının mikrobiyal popülasyonu ve aktiviteleri artırdığı bildirilmiştir (Maji ve ark., 2017; Li ve ark., 2019). HA'nın toprak enzimatik aktivitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için bezelye ile 3 yıllık sürekli ekimde, 1.000 kg ha⁻¹ HA uygulaması sera koşullarında 140 günlük bitki büyümesinden sonra üreaz, fosfataz ve sukraz aktivitesini önemli ölçüde artırmıştır (Li ve ark., 2019). Aynı şekilde, bezelye ile yapılan bir saksı deneyinde 9.000 kg ha⁻¹ HA açısından zengin solucan gübresi uygulaması, bitki büyümesinden 12 gün sonra üreaz aktivitesini önemli ölçüde artırdı (Maji

vd., 2017). Her iki deneyde de mikrobiyal popülasyon ve C/N oranı artarak üreaz aktivitesinin artmasına neden oldu. Buna karşılık, Shen vd. (2020), bir toprak kuluçka deneyinde yıpranmış kömürden elde edilen HA uygulamasının üreaz aktivitesini engellediğini buldu. Benzer şekilde, Leonardi'ten üretilen HA toprak kuluçka deneylerinde araştırıldığında üreaz aktivitesi engellendi (AL-Kanani vd., 1990). Mikrobiyal biyokütle, AL-Kanani vd. (1990) ve Shen vd. (2020) tarafından yapılan önceki iki deneyde belirlenmemiştir, ancak toplu toprakta daha az biyolojik aktivite, mikrobiyal biyokütleyi ve buna bağlı olarak üreaz aktivitesinde azalmayı azaltmış olabilir (Elmajdoub vd, 2014). Tomar ve MacKenzie (1984) ayrıca HA karboksilik ve fenolik fonksiyonel grupları tarafından HMW ve enzim bağlanmasının üreaz aktivitesini inhibe edebileceğini öne sürmüştür. HA aynı zamanda güneş ışınları tarafından parçalanarak oksidatif stres üretimine neden olmaktadır (Darcan ve Aydın, 2012). Buda mikrobiyal popülasyon üzerinde olumsuz etkiler ortaya koyarak bitki beslenmesini etkilemektedir.

Üre, maliyet etkinliği nedeniyle ürün üreticileri tarafından kullanılan en yaygın N gübresidir. Ürenin bitki tarafından alınabilmesi için amonyuma hidrolize edilmesi gerekir. Üre hidrolizi, topraktaki mikroorganizmalar tarafından üretilen üreaz enzimleri tarafından katalize edilir (Tomar ve MacKenzie, 1984). Üre hidrolizinin hızı ayrıca yüksek nikel konsantrasyonlarıyla da ilişkilendirilmiştir (Tan vd., 2000). HA'nın şelat oluşturma özelliği nedeniyle, kompleks nikel oluşturabilir ve böylece üre hidrolizini yavaşlatabilir (Sible vd., 2021). Ancak, çeşitli çalışmalar HA'nın üre hidrolizi üzerindeki etkileri konusunda çelişkili sonuçlar göstermiştir (AL-Kanani vd., 1990; Maji vd., 2017; Li vd., 2019). Kömürden üretilen HA'nın, kontrole kıyasla üre hidrolizini iki kat azaltmıştır (Shen vd., 2020). Aynı çalışmada, toprak amonyum konsantrasyonu üçüncü güne kadar sabit kalmış, ardından büyük ölçüde azalmıştır; toprak amonyum konsantrasyonundaki azalma, toprak nitrat konsantrasyonunda buna karşılık gelen bir artışı yansıtmıştır. ALKanani vd. (1990) tarafından yapılan benzer bir deneyde, Leonardi'ten üretilen %3,4'e kadar HA'nın uygulanması, Typic Hapludoll ve Typic Cryochrept topraklarında üre hidrolizinde %5-22'lik bir artışla sonuçlanmıştır. Yukarıda belirtilen tüm deneylerde, HA ile muamele edilmiş topraklarda pH'da bir düşüş görülmüştür. Ayrıca HA uygulamasının toprak nitrifikasyon mikroorganizmalarını azalttığı, böylece amonyum

konsantrasyonunu artırdığı ve toprak nitrifikasyon oranını azalttığı gösterilmiştir (Dong vd., 2009). Rizosferde üre hidrolizi ve nitrifikasyonu üzerinde biyokömür, turba ve humalitın etkisini incelemek için arpa ile yetiştirilen bir saksı deneyinde, daha yüksek HA içeren humalit, ürenin amonyuma hidrolizini artırırken, amonyumun nitrata nitrifikasyonunu azaltmıştır (Laskosky vd., 2020). Humalit uygulamasındaki yüksek amonyum tutulumu, katyon değişim kapasitesi (CEC)'nin artmasına ve pH'ın düşmesine neden olmuştur. Farklı çalışmalarda kullanılan HA'nın farklı kimyasal ve yapısal bileşime ve uygulama oranlarına sahip olduğunu belirtmek önemlidir. Bu nedenle, tanımlanmış büyüme koşulları altında farklı ürünlerde HA kaynaklarının ve uygulama oranının üre hidrolizi ve ardından gelen nitrifikasyon ve denitrifikasyon üzerindeki etkisini araştırmak ilginç olacaktır.

Yüksek HA dozları toprağın fiziksel özelliklerinin artmasıyla ilişkilendirilse de (Gollenbeek ve Van Der Weide, 2020), bunların toprak kimyasal özellikleri ve ürünler üzerindeki etkileri hala belirsizdir (Rose vd., 2014). Rose vd. (2014) tarafından yapılan incelemede, çoğunlukla sera deneylerinde analiz edilen faktörler arasında HA kaynağının hem kök hem de sürgün büyümesi üzerinde önemli etkileri varken, uygulama oranının sürgün büyümesini yalnızca önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. De Melo vd. (2016) tarafından yapılan bir inceleme, topraktaki işlevlerinden büyük ölçüde sorumlu olan baskın HA özellikleri olarak karboksilik (COOH) ve fenolik (OH) gruplarını vurgulamıştır. Nardi vd. (2021) tarafından yakın zamanda yapılan bir inceleme, HA'nın kimyasal ve moleküler yapılarının, kaynaklarının ve uygulama oranlarının ürünler ve toprak üzerindeki etkilerini belirlemede kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. Daha da önemlisi, HA uygulaması muhtemelen farklı HA biyolojik kökenleri nedeniyle verim üzerinde tutarsız sonuçlara sahip olabilir (Sible vd., 2021).

3. BİTKİ-MİKROORGANİZMA ETKİLEŞİMLERİ: BESİN ALIMINI KOLAYLAŞTIRAN ORTAKLIKLAR

Bitkilerin büyüme ve gelişmelerini sürdürebilmeleri için toprağın sunduğu sınırlı besin elementlerini etkin bir şekilde alabilmeleri kritik öneme sahiptir. Birçok tarımsal üretim sistemi, yüksek verim elde etmek adına yoğun gübre kullanımına dayanmaktadır. Ancak aşırı gübre kullanımı çevre kirliliğine ve doğal kaynakların tükenmesine yol açmaktadır (Çakmakçı, 2005). Bu

noktada, bitkilerin kök bölgesinde yaşayan faydalı mikroorganizmalar, bitki beslenmesini iyileştirerek kimyasal gübre ihtiyacını azaltabilecek doğal çözümler sunmaktadır. Özellikle mikoriza mantarları ve rizosferde yaşayan yararlı bakteriler (bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler, PGPR), bitkiyle kurdukları simbiyotik ilişkiler sayesinde bitkinin su ve mineral madde alımını artırabilmektedir (Fasusi vd., 2023). Bu tür mutualistik etkileşimler mikroorganizmalara bitki köklerinden karbon ve enerji kaynağı sağlarken bitkiye azot, fosfor gibi besinleri sağlama esasına dayanır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bitki-mikroorganizma ortaklıklarının ekosistem, sürdürülebilir tarım ve besin döngüleri açısından hayati roller oynadığını ortaya koymaktadır (Begum vd., 2019; Igiehon & Babalola, 2018).

Bitki kök bölgesinde yaşayan bakteriler bitki gelişimini destekleyici özellikleri nedeniyle bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR) olarak adlandırılır (Vessey, 2003). PGPR'ler biyolojik azot fiksasyonu yoluyla atmosferik azotu bitkinin kullanabileceği forma dönüştürür (Igiehon & Babalola, 2018). Ayrıca fosforu çözünür hale getirme yetenekleri ile bitki beslenmesine katkıda sağlarlar (Etesami vd., 2017). PGPR'ler siderofor salgılayarak demir alımını artırır ve çeşitli fitohormonları (örneğin IAA) üreterek kök gelişimini teşvik ederler (Novo vd., 2018; Verma vd., 2017). Ayrıca PGPR'ler abiyotik ve biyotik stresin ve bunlarla ilişkili stres etilenin zararlı etkilerini hafifleterek, topraktaki organik kirleticileri parçalayarak, fitopatojen saldırısını bastırarak, toprak verimliliğinin artmasına ve bitki kök bölgesinde sağlıklı bir mikro çevre oluşmasına da katkı sağlarlar (Gupta & Pandey, 2021).

Bitkilerin besin alımında görevli olan bir diğer mikroorganizma grubu ise mikorizalardır. Mikorizalar, bitki kökleri ile mantarlar arasında karşılıklı yarar esasına dayalı bir ortaklıktır. Bitki, fotosentezle ürettiği karbon kaynaklarını mantarla paylaşırken, mantarda bitkinin topraktan su ve besin elementlerini almasını sağlar (Ahmed vd., 2025; Palta vd., 2010). Mikorizalar çoğunlukla tarla bitkisi ile otsu bitkilerde yaygın olan endomikoriza (arbüsküler mikoriza, AM) ve sıklıkla orman ağaçlarında rastlanan ektomikoriza olmak üzere farklı tiplerde görülür (Cram & Kasten Dumroese, 2012; Kibar & Pekşen, 2007; Palta vd., 2010). Bu ilişki sayesinde bitki köklerinin etkin besin toplama yüzeyi mantar hifleri aracılığıyla büyük ölçüde genişler. Mikoriza mantarının toprak içine uzanan ince hif ağı, özellikle

fosfor başta olmak üzere pek çok besin elementinin bitkiye transferini sağlar (Palta vd., 2010; Smith vd., 2011; van der Heijden vd., 2015). Mikoriza mantarları fosforun yanı sıra azot, çinko, bakır, kalsiyum ve mangan gibi diğer besin elementlerinin alımını da kolaylaştırır. Mantar hifleri topraktaki organik maddelerin ayrışmasını hızlandırarak besin elementlerini bitkiler için kullanılabilir forma dönüştürmeye katkı sağlar (Begum vd., 2019; Marschner & Dell, 1994; Palta vd., 2010).

Görüldüğü üzere mikoriza mantarları ve PGPR'ler gibi simbiyontlar, bitki köklerinin erişim alanını genişleterek biyolojik ve kimyasal süreçlerle besinleri bitki için kullanılabilir hale getirerek doğal ortamdaki kısıtlı besin kaynaklarından faydalanmayı artırır. Özellikle tarımda biyolojik gübre yaklaşımıyla mikoriza ve PGPR uygulamaları sürdürülebilir tarımı teşvik ederken aynı zamanda toprak sağlığı ve gıda güvenliğini de korumaktadır (Ahmed vd., 2025; Çakmakçı, 2005; Calderon & Dangi, 2024; Fasusi vd., 2023).

4. BİTKİ HORMONLARININ ÜRETİMİ (PGPR): HORMON ÜRETİMİ, STRES TOLERANSI VE KÖK GELİŞİMİ ÜZERİNE ETKİLER

Bitki-mikroorganizma etkileşimleri: besin alımını kolaylaştıran ortaklıklar başlığında değinmiş olduğumuz bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR), bitkilerin büyüme ve gelişmelerine katkıda bulunan çeşitli mekanizmalarla ön plana çıkmaktadır. Bu mikroorganizmalar, bitki ile simbiyotik veya serbest yaşayan formlarda bulunabilir ve bitki büyümesini doğrudan veya dolaylı yollarla destekleyebilirler. PGPR'lerin bitkilere sağladığı doğrudan katkılar arasında, bitki hormonlarının (fitohormonlar) üretimi en önemli işlevlerden biri olarak kabul edilmektedir (Çakmakçı, 2005; Glick, 2012).

PGPR'ler tarafından sentezlenen başlıca fitohormonlar; oksinler (özellikle Indole-3-asetik asit, IAA), gibberellinler, sitokininler, etilen ve abiyotik streslerle ilişkili hormonlardır (Vessey, 2003). Bu hormonlar bitkilerde hücre bölünmesi, kök gelişimi, uzaması, yaprak oluşumu ve çiçeklenme gibi pek çok gelişimsel süreci düzenler. Örneğin IAA, PGPR'ler tarafından triptofan yolağı üzerinden sentezlenir, tohum ve yumru çimlenmesini uyararak kök sisteminin dallanmasını, uzamasını teşvik eder ve bitkinin toprak içindeki besin

maddelerine erişimini artırır. Ayrıca IAA hücre bölünmesi, vejetatif büyüme süreçlerinin kontrolü, fotosentez, pigment oluşumunu, çeşitli metabolitlerin biyosentezi ve stres koşullarına direnci de etkiler (Glick, 2012; Spaepen vd., 2007; Tsavkelova vd., 2006).

Sitokininler bitki hormonlarının önemli bir grubunu oluşturur. Hücresel çoğalma, farklılaşmanın sürdürülmesi ve yaşlanmanın önlenmesinde önemli rol oynayarak erken yaprak yaşlanmasının engellenmesini sağlarlar. *Azospirillum*, *Bacillus*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Proteus*, *Pseudomonas* ve *Xanthomonas* gibi PGPR'lerin sitokinin üretiminde rol aldığı bilinmektedir (Novo vd., 2018).

Bitki gelişimini teşvik eden bir diğer fitohormon grubu olan gibberellinler tohum çimlenmesi, gövde ve hipokotil uzaması, yaprak ve hipokotil genişlemesi, polen olgunlaşması, çiçeklenme ve meyve tutumu gibi birçok gelişimsel süreçte önemli bir rol oynar. Bugüne kadar yaklaşık 136 farklı gibberellin bileşiği tanımlanmış ve bunlardan 128'inin bitkilerde, 7'sinin mantarlarda ve sadece 4'ünün bakterilerde (GA1, GA3, GA4 ve GA20) olduğu tespit edilmiştir. Bakteriyal kaynaklı gibberellin üretimi *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Herbaspirillum* ve *Rhizobium* gibi PGPR cinsleri ile ilişkilendirilmiştir. PGPR'ler tarafından sağlanan dışsal gibberellin takviyesi, bitkisel verimlilik ve stres toleransının artırılmasında da önemli bir biyolojik araç olarak değerlendirilmektedir (Glick, 2012; Novo vd., 2018).

Tüm yüksek bitkilerde bulunabilen bir diğer fitohormon da etilendir. Etilen, kök oluşumu, meyvenin olgunlaşması, tohumun çimlenmesi, yaprağın dökülmesi ve çiçeğin solması gibi birçok biyolojik süreci teşvik ederken, kök uzaması, *Rhizobia* spp. nodül oluşumu ve mikoriza-bitki etkileşimi gibi süreçleri ise inhibe etmektedir. Ayrıca etilen hem biyotik hem de abiyotik streslere yanıt verme gibi birçok gelişim sürecini de desteklemektedir.

PGPR'ler hormon üretimi ile özellikle kuraklık, tuzluluk, ağır metal toksisitesi ve soğuk gibi abiyotik stres faktörlerine karşı bitkilerin dayanıklılığını artırmak için çok sayıda savunma mekanizmasını tetiklemektedirler (Giannelli vd., 2023; Karnwal vd., 2023; Yang vd., 2009). Bunlardan biri, ACC (1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit) deaminaz enziminin üretimidir. ACC, etilen biyosentezinde ara basamak olarak yer alır ve stres koşullarında aşırı üretildiğinde bitki büyümesini baskılayabilir. PGPR'ler ACC deaminaz enzimiyle bu molekülü parçalayarak bitkinin etilen

düzeyini düşürür ve stres koşullarında dahi büyümenin devamını sağlar (Glick, 2012).

Sonuç olarak bitki gelişimini teşvik eden rizobakteriler (PGPR); IAA, gibberellin ve sitokinin gibi hormonları üreterek, kök sisteminin güçlenmesine, hücre bölünmesinin hızlanmasına, çevresel stres faktörlerine karşı bitkinin direnç geliştirmesi için sekonder metabolit içeriğinin değişmesine ve hayatta kalmasına destek olmaktadır. Bitkide meydana gelen bu sekonder metabolit değişimleri mikroorganizmalar üzerindeki etkileri nedeniyle aynı zamanda mikrobiyal çeşitliliği de etkilemektedir (Darcan ve ark. 2021, Leblebici ve ark. 2016). Bu etkiler göz önüne alındığında PGPR'lerin tarımsal sistemlere entegre edilmesi ile birlikte biyolojik gübre uygulamaları ile kimyasal girdilere ihtiyaç azalacak ve sürdürülebilir tarım stratejileri için önemli alternatifler oluşacaktır. (Egamberdieva vd., 2017).

5. SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIMDA MİKROBİYAL KAYNAKLARIN KULLANIMI

Sürdürülebilir tarım, insan yaşamının sürekliliği için gerekli olan kalitede ve yeterli miktarda gıda üretimini doğa ile uyumlu bir biçimde gerçekleştirmek için kullanılan tüm uygulamaları kapsamaktadır. Amaç, sınırlı olan doğal kaynakları mümkün olduğunca verimli kullanmaktır. Geleneksel tarım yöntemleri kısa vadede yüksek verim ve kar getiriyor gibi görünse de uzun vadede doğaya ve çevreye ciddi zararlar verebilmektedir. Bu nedenle doğanın ve ekosistemin varlığını sürdürebilmesi için çevre dostu ve sürdürülebilir tarım yöntemlerinin kullanılması çok önemlidir. Mikrobiyal kaynaklar, burada oldukça etkili ve sürdürülebilir çözümler ortaya koyarak bitki beslenmesi, bitki korunması ve toprak sağlığının artırılması gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Biyogübre, bitkilerin büyümesini ve verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan, canlı mikroorganizmalar içeren doğal gübre türüdür (Chaudhary vd., 2022). Mikrobiyal gübreler, bitkilerin besin maddelerine daha kolay bir şekilde ulaşmasını sağlarken kimyasal gübrelerle kıyasla daha sürdürülebilir ve çevre dostu alternatifler sunmaktadır. Örneğin azot ihtiyacı için kimyasal gübrelerin yerine *Rhizobium* ve *Azospirillum* gibi azot fiksasyonu yapan bakterilerin kullanılması toprağa azot kazandırılmasını sağlamaktadır (Nosheen vd., 2021). Benzer şekilde mikorizal mantarlar bitkinin su ve besin

alımını arttırmak için kullanılmaktadır (Zhang vd., 2022). Biyogübre olarak kullanılan bir diğer grup ise bitkisel hormonlar aracılığıyla bitki büyümesini teşvik eden bakterilerdir (Mustafa vd., 2019). Biyogübreler, hem bitki verimliliğini arttıran hem de sürdürülebilirliğe katkı sağlayan önemli tarım araçlarıdır.

Bitki hastalıklarının önlenmesi ve tedavisi, tarımsal üretimde verim ve kalite kaybını engellemek için kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla kullanılan pestisitler hızlı sonuç veren ancak çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi olan kimyasallardır. Biyopestisitler ise doğal kaynaklardan elde edilen çevre dostu ve sürdürülebilirliği destekleyen biyolojik ajanlardır. Biyopestisitler genellikle doğada kolayca parçalanabilen ve yararlı organizmalara zarar vermeyen bir çözüm sunmaktadır. Mikrobiyal kaynaklar hem patojenleri baskılama hem de bitkilerde uyarılmış sistemik direnci tetikleme yeteneği nedeniyle biyopestisit olarak kullanılmaktadır. *Bacillus thuringiensis* gibi bakteriler bazı böcek larvalarını öldüren toksinler üretmektedir. Bu mikroorganizmaların biyopestisit olarak kullanılması ile birlikte mısır kurdu, pamuk yaprak kurdu gibi önemli tarım zararlılarıyla etkili bir şekilde mücadele edilmektedir (Bravo vd., 2011). Benzer şekilde bakteriyel hastalıklara karşı da mikroorganizmalar kullanılmaktadır. Örneğin, *Pseudomonas fluorescens* ve *Bacillus subtilis* gibi bakteriler, patojen bakterilere karşı antibiyotik benzeri maddeler salgılayarak bitki köklerini korur ve toprakta mikrobiyal dengeyi destekler (Santoyo vd., 2012). Bakteriyel hastalıklarla mücadeledeki bir diğer yöntem ise bakteriyofajların kullanılmasıdır (Bekircan Eski & Darcan, 2023). Bakteriyofajlar, yalnızca bakterileri enfekte eden ve öldüren virüslerdir; dolayısıyla bakteriyel hastalıkların neden olduğu tarımsal kayıpların önlenmesinde yüksek hedef hassasiyetiyle kullanılabilirler. Bu çok yönlü yöntemler sayesinde tarım zararlılarının neden olduğu etki doğa ile uyumlu bir şekilde kontrol altına alınırken sürdürülebilir bir üretim yaklaşımı kullanılmış olur.

Mikrobiyal kaynakların tarımda etkin bir şekilde kullanılabilmesi, modern biyoteknolojik yöntemlerin ve mühendislik yaklaşımlarının gelişimiyle doğrudan ilişkilidir. Kullanım için uygun mikroorganizma türünün seçimi, çoğaltılması, formülasyonu ve uygulama yönteminin belirlenmesi uygulamanın başarısı ve sürdürülebilirliği için kritik bir öneme sahiptir. Her mikroorganizma, belirli bir çevresel koşulda belirli bir işlevi yerine

getirebilmektedir. Bu nedenle belirlenen biyolojik işlevi yerine getirmek için uygun mikroorganizmanın seçilmesi gereklidir. Uygun olmayan bir türün seçilmesi beklenen etkinin gerçekleşmemesine, ekonomik kayıplara hatta ekolojik dengenin bozulmasına yol açabilir. Bu nedenle uygun mikroorganizma toprak özelliklerine, iklim koşullarına, bitki türüne ve ekosistem özelliklerine dikkat edilerek bilimsel verilere dayalı bir değerlendirme süreci sonunda belirlenmelidir (O’Callaghan vd., 2022). Uygun organizma belirlendikten sonra optimum şekilde organizmaların çoğaltılması gerekmektedir. Üretim tekniklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile birlikte yüksek canlılık, genetik saflık ve işlevsel olarak stabil olan organizmalar elde edilir. Böylece tarım alanında biyolojik olarak doğru aktiviteyi gösterebilecek sağlıklı mikroorganizmalar kullanılabilir. Yanlış ya da yetersiz üretim teknikleri sonucunda mikroorganizmalar zayıflayabilir, kontaminasyon olabilir ya da istenilen işlevi göstermeyebilir. Bu nedenle tarımsal başarı için uygun üretim tekniklerinin kullanılması gereklidir (María Díaz-Rodríguez vd., 2025). Formülasyon ve uygulama yöntemi de tarım alanında istenilen etkiyi almak için oldukça önemli aşamalardır. Laboratuvarda optimal koşullar altında üretim gerçekleştirilir ancak dış ortamda sıcaklık, UV ve pH gibi çok sayıda stres faktörü bulunmaktadır. Formülasyon, mikroorganizmaların stabil, uzun ömürlü, kolay uygulanabilir ve çevresel faktörlere karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Böylece mikroorganizmaların canlılığı korunur ve uygulandığı alanda hedeflenen biyolojik aktiviteyi gerçekleştirebilir (Khan vd., 2023). Formülasyon kadar önemli bir diğer faktör uygulama yöntemidir. Mikrobiyal ürün toprağa uygulanabileceği gibi tohum kaplama veya doğrudan yaprağa püskürtme şeklinde de uygulanabilir. Kullanılacak olan yöntem zamana, yere ve mahsülün türüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Dolayısıyla mikrobiyal ürünün doğru dozda ve doğru yöntemle uygulanması başarıyı etkileyen en temel faktörlerden birisidir (O’Callaghan vd., 2022).

Mikroorganizmaların tarımda kullanımının yaygınlaşması bazı sorunlar ve sınırlamalarla karşı karşıyadır ancak gelecek için büyük bir potansiyel barındırmaktadır. Mikroorganizmalar laboratuvar ortamlarında beklenen biyolojik aktiviteyi gösterebilir ancak farklı çevresel şartlar altında farklı metabolik özellikler gösterebilmektedir. Sıcaklık, nem, pH ve UV ışını gibi faktörlerin kontrol edilemediği açık tarla koşullarında organizmalar etkinliklerini ve canlılıklarını kaybedebilir. Bu nedenle kullanılacak olan

mikroorganizmaların tarım alanına adaptasyonu oldukça önemlidir. Ayrıca, uygulanan mikroorganizmaların hali hazırda toprakta bulunan mikroorganizmalarla rekabet edebilmesi ve bu rekabet sırasında beklenen işlevi yerine getirebilmesi mümkün olmayabilir. Bunun yanı sıra ticarileşmiş ürünün üretimden uygulamaya kadar olan süreçteki saklama koşullarında yaşanabilecek ihlaller bu ürünün etkisinin azalmasına ya da tamamen ortadan kalkmasına neden olabilir. Ekonomik açıdan bakıldığında ise, bir mikrobiyal adayın formülasyonu, üretimi ve ticarileşmesi oldukça maliyetlidir ve uzun bir süreç gerektirmektedir. Dolayısıyla maliyet, ürün etkilerinin geç gözlenmesi ve diğer alternatiflere duyulan güven mikrobiyal ürünlerin tarımda kullanılmasını sınırlandırmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ahmed, N., Li, J., Li, Y., Deng, L., Deng, L., Chachar, M., Chachar, Z., Chachar, S., Hayat, F., Raza, A., Umrani, J. H., Gong, L., & Tu, P. (2025). Symbiotic synergy: How Arbuscular Mycorrhizal Fungi enhance nutrient uptake, stress tolerance, and soil health through molecular mechanisms and hormonal regulation. *IMA fungus*, 16, e144989.
- Aji, D., Misra, P., Singh, S., & Kalra, A. (2017). Humic acid rich vermicompost promotes plant growth by improving microbial community structure of soil as well as root nodulation and mycorrhizal colonization in the roots of *Pisum sativum*. *Appl. Soil Ecol.* 110, 97–108.
- AL-Kanani, T., MacKenzie, A. F., & Blenkhorn, H. (1990). Volatilization of ammonia from urea-ammonium nitrate solutions as influenced by organic and inorganic additives. *Fertil. Res.* 23, 113–119.
- Ampong, K., Thilakarathna, M. S., & Gorim, L. Y. (2022). Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health. *Frontiers in Agronomy*, 4, 848621.
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Growth Regulation: Implications in Abiotic Stress Tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 466052.
- Bekircan Eski, D., & Darcan, C. (2023). Isolation of *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*-specific bacteriophages from tomato fields in Turkey and their biocontrol potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 33(1), 1-10.
- Bhatt, P., & Singh, V. K. (2022). Effect of humic acid on soil properties and crop production—A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(12), 1423-1430.
- Bhattacharyya, S. S., & Furtak, K. (2022). Soil–Plant–Microbe interactions determine soil biological fertility by altering rhizospheric nutrient cycling and biocrust formation. *Sustainability*, 15(1), 625.
- Billingham, K. L. (2012). “Humic products-potential or presumption for agriculture? Can humic products improve my soil?” in 27th Annual Conference (Orange, NSW: Grassland Society of NSWInc.).

- Bravo, A., Likitvivatanavong, S., Gill, S. S., & Soberón, M. (2011). *Bacillus thuringiensis*: a story of a successful bioinsecticide. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 41(7), 423-431.
- Calderon, R. B., & Dangi, S. R. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizobium Improve Nutrient Uptake and Microbial Diversity Relative to Dryland Site-Specific Soil Conditions. *Microorganisms*, 12(4), 667.
- Chaudhary, P., Singh, S., Chaudhary, A., Sharma, A., & Kumar, G. (2022). Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 930340.
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Denef, K., & Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. *Global change biology*, 19(4), 988-995.
- Cram, M. M., & Kasten Dumroese, R. (2012). Mycorrhizae in Forest Tree Nurseries.
- Cui, Y., Wang, X., Zhang, X., Ju, W., Duan, C., Guo, X., ... & Fang, L. (2020). Soil moisture mediates microbial carbon and phosphorus metabolism during vegetation succession in a semiarid region. *Soil Biology and Biochemistry*, 147, 107814.
- Çakmakçı, R. (2005). Bitki gelişimini teşvik eden rizobakterilerin tarımda kullanımı. *dergipark.org.tr*, 36(1), 97–107.
- Dai, Z., Liu, G., Chen, H., Chen, C., Wang, J., Ai, S., ... & Xu, J. (2020). Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems. *The ISME journal*, 14(3), 757-770.
- Darcan, C., Aydin, E. (2012). *fur*⁻ mutation increases the survival time of *Escherichia coli* under photooxidative stress in aquatic environments. *Acta Biologica Hungarica*, 63 (3), 399-409
- Darcan, C., Kaygusuz, Ö., Leblebici, S., Gülümser, E., Acar, Z. (2021). Antimicrobial activity of leaf extracts of *Bituminaria* sp. genotypes at different growth stages. *Indian Journal of Experimental Biology*, 59 (May), 302-309
- De Melo, B. A. G., Motta, F. L., and Santana, M. H. A. (2016). Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. *Mater. Sci. Eng.*, C 62, 967–974.

- Dong, L., Córdova-Kreylos, A. L., Yang, J., Yuan, H., and Scow, K. M. (2009). Humic acids buffer the effects of urea on soil ammonia oxidizers and potential nitrification. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 1612–1621.
- Dong, X., Lv, L., Wang, W., Liu, Y., Yin, C., Xu, Q., ... & Liu, X. (2019). Differences in distribution of potassium-solubilizing bacteria in forest and plantation soils in Myanmar. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 700.
- Eder, S., Shi, L., Jensen, K., Yamane, K., & Hulett, F. M. (1996). A *Bacillus subtilis* secreted phosphodiesterase/alkaline phosphatase is the product of a *Pho* regulon gene, *phoD*. *Microbiology*, 142(8), 2041-2047.
- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd-Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2104.
- Elmajdoub, B., Barnett, S., and Marschner, P. (2014). Response of microbial activity and biomass in rhizosphere and bulk soils to increasing salinity. *Plant Soil*, 381, 297–306.
- Etesami, H., Emami, S., & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects - a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897–911.
- Fasusi, O. A., Babalola, O. O., & Adejumo, T. O. (2023). Harnessing of plant growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystem sustainability. *CABI Agriculture and Bioscience*, 4(1), 1–15.
- García, A. C., De Souza, L. G. A., Pereira, M. G., Castro, R. N., García-Mina, J. M., Zonta, E., et al. (2016). Structure-property-function relationship in humic substances to explain the biological activity in plants. *Sci. Rep.*, 6, 20798.
- García, A. C., van Tol de Castro, T. A., Santos, L. A., Tavares, O. C. H., Castro, R. N., Berbara, R. L. L., et al. (2019). Structure-property-function relationship of humic substances in modulating the root growth of plants: a review. *J. Environ. Qual.*, 48, 1622–1632.
- Ghabbour, E. A., & Davies, G. (Eds.). (2014). Humic substances: structures, properties and uses. Woodhead Publishing.

- Giannelli, G., Potestio, S., & Visioli, G. (2023). The Contribution of PGPR in Salt Stress Tolerance in Crops: Unravelling the Molecular Mechanisms of Cross-Talk between Plant and Bacteria. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 2197, 12(11), 2197.
- Glick, B. R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 2012, 963401.
- Gollenbeek, L., and Van Der Weide, R. (2020). Prospects for Humic Acid Products From Digestate in the Netherlands. *Report WPR-867*, 5–40.
- Gupta, S., & Pandey, S. (2021). Exploiting the potential of plant growth-promoting rhizobacteria in legume production. *Abiotic Stress and Legumes: Tolerance and Management*, 1–32.
- Hanif, M. S., Tayyab, M., Baillo, E. H., Islam, M. M., Islam, W., & Li, X. (2024). Plant microbiome technology for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1500260.
- Haworth, R. D. (1971). The chemical nature of humic acid. *Soil Science*, 111(1), 71-79.
- Hayes, M. H. B., and Swift, R. S. (2020). Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. *Adv. Agron.*, 163, 1–37.
- Igiehon, N. O., & Babalola, O. O. (2018). Rhizosphere Microbiome Modulators: Contributions of Nitrogen Fixing Bacteria towards Sustainable Agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 574.
- Karnwal, A., Shrivastava, S., Al-Tawaha, A. R. M. S., Kumar, G., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). PGPR-Mediated Breakthroughs in Plant Stress Tolerance for Sustainable Farming. *Journal of Plant Growth Regulation* 2023, 43:9, 43(9), 2955–2971.
- Khan, A., Singh, A. V., Gautam, S. S., Agarwal, A., Punetha, A., Upadhayay, V. K., Kukreti, B., Bundela, V., Jugran, A. K., & Goel, R. (2023). Microbial bioformulation: a microbial assisted biostimulating fertilization technique for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1270039.
- Kibar, B., & Pekşen, A. (2007). Ektomikorizanın Tarım ve Ormancılık Bakımından Önemi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 22(2), 232–238.

- Kuypers, M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16(5), 263-276
- Lalitha, M., & Dhakshinamoorthy, M. (2014). Forms of soil potassium-a review. *Agricultural reviews*, 35(1).
- Laskosky, J. D., Mante, A. A., Zvomuya, F., Amarakoon, I., & Leskiw, L. (2020). A bioassay of long-term stockpiled salvaged soil amended with biochar, peat, and humalite. *Agrosyst. Geosci. Environ.*, 3, e20068.
- Leblebici, S., Kaygusuz, Ö., Korkmaz, T., Darcan, C. (2016). The antimicrobial activities of the leaves of some endemic *Stachys* species spreading in West Anatolia Turkey. *Mitteilungen Klosterneuburg* 66 (6), 18-28
- Li, Y., Fang, F., Wei, J., Wu, X., Cui, R., Li, G., et al. (2019). Humic acid fertilizer improved soil properties and soil microbial diversity of continuous cropping peanut: A three-year experiment. *Sci. Rep.*, 9, 1–9.
- Liang, J. L., Liu, J., Jia, P., Yang, T. T., Zeng, Q. W., Zhang, S. C., ... & Li, J. T. (2020). Novel phosphate-solubilizing bacteria enhance soil phosphorus cycling following ecological restoration of land degraded by mining. *The ISME journal*, 14(6), 1600-1613.
- Liu, X., Herbert, S. J., Hashemi, A. M., Zhang, X. F., & Ding, G. (2006). Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation-a review. *Plant, Soil and Environment*, 52(12), 531-543.
- Luo, G., Sun, B., Li, L., Li, M., Liu, M., Zhu, Y., ... & Shen, Q. (2019). Understanding how long-term organic amendments increase soil phosphatase activities: insight into phoD-and phoC-harboring functional microbial populations. *Soil Biology and Biochemistry*, 139, 107632.
- María Díaz-Rodríguez, A., Parra Cota, F. I., Alberto, L., Chávez, C., Fernando, L., Ortega, G., Alvarado, I. E., Santoyo, G., De Los Santos-Villalobos, S., Borlaug-Inifap, N. E., Field, E., Borlaug, N. E., & 12, K. (2025). Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions. *Plants* 2025, 14(2), 191.
- Marschner, H., & Dell, B. (1994). Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, 159(1), 89–102.
- Melero, S., Madejón, E., Herencia, J. F., & Ruiz, J. C. (2008). Effect of implementing organic farming on chemical and biochemical properties of an irrigated loam soil. *Agronomy Journal*, 100(1), 136-144.

- Mirza, M. A., Agarwal, S. P., Rahman, M. A., Rauf, A., Ahmad, N., Alam, A., et al. (2011). Role of humic acid on oral drug delivery of an antiepileptic drug. *Drug Dev. Ind. Pharm.*, 37, 310–319.
- Mondal, S., Halder, S. K., Yadav, A. N., & Mondal, K. C. (2020). Microbial consortium with multifunctional plant growth-promoting attributes: future perspective in agriculture. *Advances in plant microbiome and sustainable agriculture: functional annotation and future challenges*, 219-258.
- Mooshammer, M., Wanek, W., Hämmerle, I., Fuchslueger, L., Hofhansl, F., Knoltsch, A., ... & Richter, A. (2014). Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon: nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. *Nature communications*, 5(1), 3694.
- Murphy, D. V., Stockdale, E. A., Brookes, P. C., & Goulding, K. W. (2007). Impact of microorganisms on chemical transformations in soil. *Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture*, 37-59
- Mustafa, S., Kabir, S., Shabbir, U., & Batool, R. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: from theoretical to pragmatic approach. *Symbiosis*, 78(2), 115-123.
- Myneni, S. C. B., Brown, J. T., Martinez, G. A., & Meyer-Ilse, W. (1999). Imaging of humic substance macromolecular structures in water and soils. *Science*, 286(5443), 1335-1337.
- Nardi, S., Schiavon, M., and Francioso, O. (2021). Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. *Molecules* 26, 2256.
- Nosheen, S., Ajmal, I., & Song, Y. (2021). Microbes as biofertilizers, a potential approach for sustainable crop production. *Sustainability*, 13(4), 1868.
- Novo, L. A. B., Castro, P. M. L., Alvarenga, P., & da Silva, E. F. (2018). Plant Growth–Promoting Rhizobacteria-Assisted Phytoremediation of Mine Soils. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*, 281–295.
- Nutaratat, P., Monprasit, A., & Srisuk, N. (2017). High-yield production of indole-3-acetic acid by *Enterobacter* sp. DMKU-RP206, a rice phyllosphere bacterium that possesses plant growth-promoting traits. *3 Biotech*, 7, 1-15.

- O'Callaghan, M., Ballard, R. A., & Wright, D. (2022). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: limitations and opportunities. *Soil Use and Management*, 38(3), 1340-1369.
- Palta, Ş., Demir, S., Şengönül, K., Kara, Ö., & Şensoy, H. (2010). Arbüsküler mikorizal funguslar (AMF), Bitki ve Toprakla İlişkileri, Mera Islahındaki Önemleri. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 12(18), 87–98.
- Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., and Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: Practical implications for agriculture. *Adv. Agron.*, 124, 37–89.
- Rupiasih, N. N. (2005). A review: Compositions, structures, properties and applications of humic substances. *J. Adv. Sci. Technol.*, 8, 16–25.
- Santoyo, G., del Orozco-Mosqueda, M. C., & Govindappa, M. (2012). Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: a review. *Biocontrol Science and Technology*, 22(8), 855-872.
- Sarikhani, M. R., Oustan, S., Ebrahimi, M., & Aliasgharzad, N. (2018). Isolation and identification of potassium-releasing bacteria in soil and assessment of their ability to release potassium for plants. *European journal of soil science*, 69(6), 1078-1086.
- Schnitzer, M. (1978). Humic substances: chemistry and reactions. *In Developments in soil science*, 8, 1-64.
- Shen, Y., Lin, H., Gao, W., and Li, M. (2020). The effects of humic acid urea and polyaspartic acid urea on reducing nitrogen loss compared with urea. *J. Sci. Food Agric.*, 100, 4425–4432.
- Shi, J., Gong, J., Li, X., Zhang, Z., Zhang, W., Li, Y., ... & Baoyin, T. T. (2022). Plant–microbial linkages regulate soil organic carbon dynamics under phosphorus application in a typical temperate grassland in northern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 335, 108006.
- Sible, C. N., Seebauer, J. R., & Below, F. E. (2021). Plant biostimulants: A categorical review, their implications for row crop production, and relation to soil health indicators. *Agronomy*, 11(7), 1297.
- Singh, B., Boukhris, I., Kumar, V., Yadav, A. N., Farhat-Khemakhem, A., Kumar, A., ... & Alghamdi, O. A. (2020). Contribution of microbial

- phytases to the improvement of plant growth and nutrition: a review. *Pedosphere*, 30(3), 295-313.
- Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F. A. (2011). Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. *Plant Physiology*, 156(3), 1050–1057.
- Song, M., Pedruzzi, I., Peng, Y., Li, P., Liu, J., & Yu, J. (2015). K-extraction from muscovite by the isolated fungi. *Geomicrobiology Journal*, 32(9), 771-779.
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 31(4), 425–448.
- Suman, J., Rakshit, A., Ogireddy, S. D., Singh, S., Gupta, C., & Chandrakala, J. (2022). Microbiome as a key player in sustainable agriculture and human health. *Frontiers in Soil Science*, 2, 821589.
- Tan, X. W., Ikeda, H., and Oda, M. (2000). Effects of nickel concentration in the nutrient solution on the nitrogen assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic culture supplied with urea or nitrate as the sole nitrogen source. *Sci. Hortic.*, 84, 265–273.
- Tomar, J. S., and MacKenzie, A. F. (1984). Effects of catechol and p-benzoquinone on the hydrolysis of urea and energy barriers of urease activity in Soils. *Can. J. Soil Sci.*, 64, 51–60.
- Tsavkelova, E. A., Klimova, S. Y., Cherdyntseva, T. A., & Netrusov, A. I. (2006). Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42(2), 117–126.
- van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M. A., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406–1423.
- van Tol de Castro, T. A., Berbara, R. L. L., Tavares, O. C. H., Mello, D. F., and da, G., Pereira, E. G. (2021). Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants. *Plant Physiol. Biochem.*, 162, 171–184.

- Verma, S., Singh, A., Pradhan, S., Singh, R. K., & Singh, J. P. (2017). Bio-efficacy of Organic Formulations on Crop Production-A Review. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.*,6(5), 648–665.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571–586).
- Wang, K., Ren, T., Yan, J., Zhu, D., Liao, S., Zhang, Y., ... & Lu, J. (2022). Straw returning mediates soil microbial biomass carbon and phosphorus turnover to enhance soil phosphorus availability in a rice-oilseed rape rotation with different soil phosphorus levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 335, 107991.
- Wang, Q., Ma, M., Jiang, X., Guan, D., Wei, D., Zhao, B., ... & Li, J. (2019). Impact of 36 years of nitrogen fertilization on microbial community composition and soil carbon cycling-related enzyme activities in rhizospheres and bulk soils in northeast China. *Applied Soil Ecology*, 136, 148-157.
- Wang, R., Zhang, H., Sun, L., Qi, G., Chen, S., & Zhao, X. (2017). Microbial community composition is related to soil biological and chemical properties and bacterial wilt outbreak. *Scientific reports*, 7(1), 343.
- Waring, B. G., Averill, C., & Hawkes, C. V. (2013). Differences in fungal and bacterial physiology alter soil carbon and nitrogen cycling: insights from meta-analysis and theoretical models. *Ecology letters*, 16(7), 887-894.
- Wood, S. A. (1996). The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, Pd, U, V). *Ore Geol. Rev.*, 11, 1–31.
- Wu, S., Li, R., Peng, S., Liu, Q., and Zhu, X. (2017). Effect of humic acid on transformation of soil heavy metals. *IOP Conf. Ser.Mater. Sci. Eng.*, 207, 012089.
- Xia, H., Riaz, M., Liu, B., Li, Y., El-Desouki, Z., & Jiang, C. (2022). Over two years study: Peanut biochar promoted potassium availability by mediating the relationship between bacterial community and soil properties. *Applied Soil Ecology*, 176, 104485.
- Xiao, B., Lian, B., & Shao, W. (2012). Do bacterial secreted proteins play a role in the weathering of potassium-bearing rock powder?. *Geomicrobiology Journal*, 29(6), 497-505.

- Xue, X., Zhang, L., Peng, Y., Li, P., & Yu, J. (2019). Effects of mineral structure and microenvironment on K release from potassium aluminosilicate minerals by *Cenococcum geophilum* fr. *Geomicrobiology Journal*, 36(1), 11-18.
- Yadav, A. N., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Dikilitas, M., ... & Saxena, A. K. (2021). Biodiversity, and biotechnological contribution of beneficial soil microbiomes for nutrient cycling, plant growth improvement and nutrient uptake. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 33, 102009.
- Yadav, A. N., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Dikilitas, M., ... & Saxena, A. K. (2021). Biodiversity, and biotechnological contribution of beneficial soil microbiomes for nutrient cycling, plant growth improvement and nutrient uptake. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 33, 102009.
- Yadav, A. N., Kumar, V., Dhaliwal, H. S., Prasad, R., & Saxena, A. K. (2018). Microbiome in crops: diversity, distribution, and potential role in crop improvement. *In Crop improvement through microbial biotechnology*, 305-332.
- Yang, F., Tang, C., and Antonietti, M. (2021). Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms. *Chem. Soc. Rev.*, 50, 6221–6239.
- Yang, J., Kloepper, J. W., & Ryu, C. M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 14(1), 1–4.
- Yetgin, A. (2023). The dynamic interplay of root exudates and rhizosphere microbiome. *Soil Studies*, 12(2), 111-120.
- Yu, L., Luo, S., Xu, X., Gou, Y., & Wang, J. (2020). The soil carbon cycle determined by GeoChip 5.0 in sugarcane and soybean intercropping systems with reduced nitrogen input in South China. *Applied Soil Ecology*, 155, 103653.
- Yuan, Z. S., Liu, F., & Zhang, G. F. (2015). Characteristics and biodiversity of endophytic phosphorus-and potassium-solubilizing bacteria in Moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Acta Biologica Hungarica*, 66, 449-459.
- Zhang, D., Kuzyakov, Y., Zhu, H., Alharbi, H. A., Li, H., & Rengel, Z. (2022). Increased microbial biomass and turnover underpin efficient phosphorus

acquisition by *Brassica chinensis*. *Soil and Tillage Research*, 223, 105492.

Zhang, M., Riaz, M., Liu, B., Xia, H., El-Desouki, Z., & Jiang, C. (2020). Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity. *Science of the Total Environment*, 717, 137286.

Zhang, W., Yu, L., Han, B., Liu, K., & Shao, X. (2022). Mycorrhizal inoculation enhances nutrient absorption and induces insect-resistant defense of *Elymus nutans*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 898969.

Zhang, Y., Zheng, Y., Hu, J., Du, N., & Chen, F. (2014). Functional diversity of the microbial community in healthy subjects and periodontitis patients based on sole carbon source utilization. *PLoS One*, 9(3), e91977.

BÖLÜM 3

BİTKİ VİRÜSLERİNDE YENİ TEHDİTLER VE KÜRESEL YAYILIM DİNAMİKLERİ

Doç. Dr. Ali KARANFİL¹

Doç. Dr. Filiz RANDA-ZELYÜT^{2*}

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16369554>

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Çanakkale, Türkiye. alikaranfil@comu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-4503-6344

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Bilecik, Türkiye. filiz.randazelyut@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar), Orcid ID: 0000-0002-1366-4389

GİRİŞ

İnsanlık, tarihin hiçbir döneminde bugünkü kadar karmaşık ve birbiriyle bağlantılı küresel zorluklarla karşı karşıya kalmamıştır. Artan nüfus, iklim değişikliği, ekosistemlerin bozulması ve sınır tanımayan fitopatojenler ve tarımsal zararlı böcekler, gıda güvenliğini tehdit eden unsurlar olarak öne çıkmaktadır. 1840'larda İrlanda'da yaşanan ve "Büyük Kıtık" ya da "Patates Kıtığı" olarak anılan olay, virüs olmasa da benzer yıkıcı etkilere sahip olan *Phytophthora infestans* (Pylum: Oomycota) adlı bir fitopatojen nedeniyle meydana gelmiştir (Fry, 2008). Bu patojenin patates bitkilerinde neden olduğu epidemi, bir milyondan fazla insanın açlık ve hastalıklar nedeniyle hayatını kaybetmesine yol açarak milyonlarca insanın göç etmesine neden olmuş ve tarihin akışını kökten değiştirmiştir. Bu trajik örnek, patojenlerin sadece biyolojik değil, aynı zamanda derin sosyoekonomik etkiler yaratabileceğinin çarpıcı bir kanıtıdır. Fitopatojenler içerisinde, bitki virüsleri de, sessiz ancak yıkıcı etkileriyle tarımsal üretimi ve doğal ekosistemleri derinden sarsan biyolojik tehditler arasında kritik bir yer tutmaktadır.

Virüsler, fitopatojenler arasında en hızlı yayılan ve kontrolü en zor olan ajanlardandır. Diğer patojen gruplarına kıyasla daha küçük genomlara sahip olmalarına rağmen, evrimsel esneklikleri ve vektörlerle taşınabilme yetenekleri sayesinde kısa sürede geniş alanlara yayılabilirler. Tarımsal üretim sistemlerinde büyük ekonomik kayıplara yol açan bitki virüsleri, aynı zamanda biyolojik çeşitlilik ve ekosistem dengesi üzerinde de ciddi tehditler oluşturmaktadır. Özellikle küreselleşme, uluslararası ticaretin artması, iklim değişikliği ve tarımda monokültür uygulamaları; virüslerin yeni bölgelere taşınmasını, yeni konukçulara adapte olmasını ve farklı ekolojik koşullarda kalıcı hale gelmesini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle, bitki virüsleri günümüzde sadece yerel değil, aynı zamanda bölgesel ve küresel düzeyde gıda güvenliğini tehdit eden önemli bir faktör hâline gelmiştir.

Bitki virüslerinin insanlık tarihindeki rolü, tarım toplumlarının ortaya çıktığı ilk dönemlere dek uzansa da bu nanometrik partiküllere sahip etmenlerin varlığı, modern teknolojinin olanaklarına erişilene kadar gizemini korumuştur. En yakın dönem örneği, 17. yüzyılda Hollanda'da patlak veren ve dünya ekonomik tarihinin ilk spekülâtif balonlarından biri sayılan "Lale Çılgınlığı" sırasında, lalelerdeki büyüleyici renk desenlerinin aslında tulip breaking virus (TBV) adlı bir virüsten kaynaklandığı ancak yüzyıllar sonra anlaşılabilirdi

(Chamberlain ve Ingram,1997). O dönemde virüs kavramı bilinmemesine rağmen, çiçeklerdeki bu estetik deformasyonların "görünmez bir patojen" ile ilişkili olduğu sezgisi, bilimsel keşiflerin sınırlarını aşan bir öngörü haline gelmiştir. 19. yüzyılın sonunda ise tobacco mosaic virus (TMV), virolojinin doğuşuna sahne oldu. Adolf Mayer'in tütün bitkisi özütlerindeki bulaşıcı etkiyi gözlemlemesi, Dmitri Ivanovsky'nin bakteriyel filtrelerden geçebilen "hastalık ajanı" fikri ve Martinus Beijerinck'in "virüs" terimini bilim literatürüne kazandırması, yaşam ile cansız madde arasındaki gri alanı tanımlamıştır (Creager, 2002). Bu keşifler, mikroskobun sınırlarını zorlayan nanometrik varlıkların biyolojik etkisini kanıtlayarak yeni bir bilim dalının temellerini atmıştır. 19. Yüzyılın ortalarında elektron mikroskobunun icadı, virüs partiküllerinin görselleştirilmesine olanak tanıyınca bitki virolojisi büyük bir sıçrama yaşamıştır. Bu teknoloji, yalnızca tarımsal üretimi tehdit eden patojenlerin tanımlanmasını hızlandırmakla kalmamıştır, aynı zamanda insan ve hayvan sağlığına yönelik viral tehditlerin anlaşılmasında da kritik bir köprü işlevi görmüştür. Böylece, lalelerin tarihsel çılgınlığından TMV enfekteli tütün bitkilerine kadar uzanan bu yolculuk, modern virolojinin gelişimine ışık tutan evrensel bir bilimsel mirasa dönüşmüştür.

Bitki patojenleri, insanlığın tarımla kurduğu simbiyotik ilişkinin karanlık bir aynası olarak, her dönemde toplumların kırılganlığını ortaya çıkarmıştır- bu durum dini inanış ve ayinlere kadar yansımıştır. Lale Çılgınlığı'nın estetik illüzyonundan Büyük Kıtık'ın yıkıcı gerçekliğine uzanan tarihsel dönüm noktaları, bu fitopatojenlerin yalnızca bitkileri değil, medeniyetlerin sosyoekonomik dokusunu da nasıl değiştirebileceğini gözler önüne sermiştir. 21. yüzyılın küresel dinamikleri, bu tehditleri önceki dönemlerle kıyaslanamayacak ölçüde karmaşık hale getirmektedir. İklim değişikliğinin böcek vektör popülasyonlarını genişletmesi, uluslararası tarımsal ürün ve üretim materyali ticaretinin patojenleri sınır tanımaz hale getirmesi ve monokültür tarımın virüsler için evrimsel bir laboratuvar işlevi görmesi, yeni bir pandemi çağının sinyallerini verebilir. Bu koşullar altında, bitki virolojisinin disiplinlerarası bir yaklaşımla yeniden konumlandırılması zaruriyet kazanmaktadır. CRISPR tabanlı tanı kitlerinden yapay zeka destekli epidemiyolojik modellemelere kadar gelişen teknolojiler, tehditlerin öngörülmesi ve kontrolünde umut vaat etse de, asıl mücadele insan merkezli politikaların bilimsel gerçeklerle uyumlu hale getirilmesinde yatmaktadır.

Gelecekteki savaşımız, yalnızca virüslerle değil, onların yayılımını tetikleyen küresel eşitsizlikler, ekolojik ihmaller ve kısa vadeli tarım politikalarıyla olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, günümüzde verim ve kalite kayıplarına neden olan bitki virüslerinin yayılım dinamikleri, tanı yöntemleri ve kontrol stratejileri ele alınmıştır. Yeni virüsler, insan kaynaklı çevresel değişimler ve tarımsal yoğunlaşmanın baskısı altında hızla evrim geçirerek direnç kırıcı varyantlara dönüşmektedir. Küresel ısınma, vektör popülasyonlarını artırmakta; uluslararası ticaret ise patojenlerin kıtalar arası taşınmasına zemin hazırlamaktadır. Monokültür tarım uygulamaları da virüsler için uygun ve savunmasız konukçu havuzları oluşturmaktadır. Bu karmaşık tehdidin yönetiminde, moleküler epidemiyoloji, yeni nesil dizileme (NGS) ve CRISPR-Cas tabanlı tanı sistemleri gibi gelişmiş teknolojiler kritik rol oynamaktadır. Ancak, sürdürülebilir bir mücadele, küresel politikalar ile yerel agroekolojik çözümler arasında güçlü bir iş birliğini zorunlu kılmaktadır. Bitki virüsleri, günümüzde biyolojik küreselleşmenin çelişkilerini yansıtmakta; bu bağlamda çalışma, tarımın geleceği ve gıda güvenliği için karantina protokollerine dikkat çekmektedir.

1. YENİ ORTAYA ÇIKAN VE YENİDEN YÜKSELEN BİTKİ VİRÜSLERİ

1.1. Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV)- Domates kahverengi buruşukluk meyve virüsü

Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV), Tobamovirus cinsine ait pozitif polariteli tek sarmallı RNA virüsüdür ve domates (*Solanum lycopersicum*) ile biber (*Capsicum* spp.) bitkilerinde ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. İlk olarak 2014 yılında Ürdün ve İsrail'de tanımlanan bu virüs (Salem vd., 2016; Luria vd., 2017), kısa sürede Avrupa, Kuzey Amerika, Asya, Orta Doğu ve Afrika dahil olmak üzere birçok ülkeye yayılmıştır ve Türkiye'de ilk defa 2019 yılında Antalya'da domates üretim alanlarında (Fidan vd. 2019) belirlenmiştir. Bu virüs, özellikle domates üretim bölgelerinde ciddi salgınlara neden olmuş ve birçok ülkede verim kayıplarının dramatik biçimde artmasına yol açmıştır (Avni et al., 2021; EPPO, 2020; Jones, 2021). Virüsün hızlı yayılımı, hem ticari tohumlar aracılığıyla taşınabilir olması hem de mekanik yolla çok kolay bulaşabilmesiyle ilişkilidir (Dombrovsky ve Smith, 2017).

Bununla birlikte, ToBRFV etmeninin taşınımı ve genetik çeşitliliği kapsamlı moleküler epidemiyolojik çalışmalar açık bir şekilde gösterilmiştir (Güller vd. 2023; Esmailzadeh vd. 2023).

ToBRFV enfeksiyonu, özellikle bitkilerin genç yapraklarda belirgin hale gelen mozaik, klorotik lekelenme, şekil bozuklukları ve meyvelerde kahverengi, pürüzlü/ buruşuk (rugoz) nekrotik lekeler gibi belirtilerle kendini gösterir. Bu belirtiler, tomato mosaic virus (ToMV) gibi diğer Tobamovirus türlerinin neden olduğu belirtiler ile karıştırılabilecek kadar benzerdir (Alon vd. 2021). Belirti şiddeti, bitki çeşidine, gelişim dönemine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, Ürdün izolatıyla enfekte sera domateslerinde meyvelerde yoğun kahverengi pürüzlü lekeler gözlemlenirken, yapraktaki belirtiler hafif kalmıştır (Salem vd. 2016). İsrail'deki sera üretim alanlarında ise yapraklarda hafiften şiddetliye kadar değişen mozaik belirtileri, meyvelerde ise lekelenme oranı %10–15'e kadar ulaşmıştır (Luria vd. 2017). Almanya ve Hollanda'da, yapraklarda daralma, klorotik beneklenme ve koyu yeşil çıkıntılar; ABD ve Çin'de ise çiçek sapı, çanak yaprak ve çiçeklerde kuruma ve kahverengi nekrotik bölgeler rapor edilmiştir (Menzel vd. 2019; Chanda vd. 2021). Biber bitkilerinde de benzer şekilde mozaik, beneklenme, sararma ve yapraklarda nekrotik lezyonlar ortaya çıkarken, meyveler üzerinde küçük sarıdan kahverengiye dönen rugoz lekeler ve nekrotik alanlar görülmektedir (Fidan vd. 2021).

Doğal ortamlarda bitkiler genellikle birden fazla virüsün birlikte enfekte etmesiyle karşı karşıya kalırlar (Randa-Zelyüt vd. 2023; Karanfil vd. 2023). Bu tür karışık enfeksiyonlar, virüsler arasında sinerjik ya da antagonistik etkileşimlere yol açabilmektedir (Syller, 2012). Şimdiye dek, Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) içeren karışık enfeksiyonlarda yalnızca sinerjik etkileşimler gözlemlenmiştir. Öte yandan, domates tarımında en yıkıcı hastalıklardan birine neden olan bir başka önemli virüs ise tomato spotted wilt virus (TSWV)'dir. ToBRFV ve TSWV'nin aynı bitkide birlikte bulunması, meyvelerdeki hastalık belirtilerinin şiddetini önemli ölçüde artırmakta, enfeksiyonun etkisini daha yıkıcı hale getirmektedir (Luria vd. 2017). Bu durum, virüslerin birlikte var olduklarında bitki sağlığı üzerinde daha büyük bir tehdit oluşturabileceğini ve entegre virüs yönetimi stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

ToBRFV'nin teşhisi için klasik yöntemlerin (ELISA, RT-PCR) yanı sıra yeni nesil dizileme (NGS) teknikleri de kullanılmaktadır. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen CRISPR-Cas tabanlı tanı sistemleri, virüsün hızlı, özgül ve sahada uygulanabilir şekilde saptanmasını mümkün kılmaktadır. Uluslararası bitki sağlığı örgütleri, bu virüs için hızlı tanı ve karantina önlemlerini devreye sokmuştur.

Avrupa Birliği, ABD, Çin, Türkiye ve diğer pek çok ülkede ToBRFV karantina patojeni olarak sınıflandırılmıştır. Virüsün yayılımını sınırlandırmak için entegre önlemler uygulanmakta; bunlar arasında temiz tohum ve fide kullanımı, üretim alanlarında sıkı hijyen kuralları, düzenli kontroller, enfekteli materyalin imhası ve seraların dezenfeksiyonu yer almaktadır. Ancak, virüsün tohumla taşınabilmesi nedeniyle küresel tohum ticareti, bulaşmanın en kritik noktalarından biri olmaya devam etmektedir. ToBRFV, 21. yüzyılın önde gelen bitki virüs tehditlerinden biri haline gelmiştir. Yüksek bulaşıcılığı, direnç genlerini aşma kabiliyeti ve geniş yayılım alanı ile ToBRFV, sadece tarımsal üretimi değil, aynı zamanda bitki sağlığı politikalarını da yeniden şekillendirmeye zorlamaktadır. Etkili bir mücadele, erken teşhis, hijyen önlemleri, dirençli çeşit geliştirme ve uluslararası iş birliğini zorunlu kılmaktadır.

1.2 Wheat streak mosaic virus (WSMV)-Buğday çizgi mozaik virüsü

Wheat streak mosaic virus (WSMV) (Buğday çizgi mozaik virüsü), ilk kez 1922 yılında Peltier tarafından ABD'nin Orta Büyük Ovalar bölgesinde yer alan Nebraska'da buğday tarlalarında "sarı mozaik" hastalığı olarak tanımlanmıştır (McKinney, 1937). Çevre koşullarına (nemli, kuru, serin veya sıcak hava) bağlı olarak WSMV enfeksiyonlarından kaynaklanan verim kaybının %60'ı aşabildiği bildirilmiştir (Langham vd. 2001).

Başlangıçta, Potyviridae familyasında yer alan ve akarlarla taşınan virüslerin bulunduğu Rymovirus cinsine dahil edilmiştir. Ancak, daha sonra yapılan tam genom dizileme çalışmaları ve evrimsel analizler, WSMV'nin, Ryegrass mosaic virus (Rymovirus cinsinin tip türü) ile değil; beyazsineklerle taşınan Sweet potato mild mottle virus ile daha yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Stenger et al., 1998). Bu bulgular doğrultusunda, WSMV'nin

tip virüs üyesi olduğu Tritimovirus adlı yeni bir cins tanımlanmıştır (Rabenstein et al., 2002).

WSMV, buğday kıvrıkcık akarı (*Aceria tosichella* Keifer) ile taşınmakta ve yayılmaktadır. Virüs, yalnızca Amerika kıtasında değil; Kanada, Meksika, Brezilya, Arjantin, Avrupa, Türkiye, İran, Avustralya ve Yeni Zelanda gibi dünyanın önde gelen buğday üretim bölgelerinde de yaygın şekilde rapor edilmiştir (Hadi et al., 2011; Navia et al., 2013). Bu virüs, buğday (*Triticum aestivum*), yulaf (*Avena sativa*), arpa (*Hordeum vulgare*), mısır (*Zea mays*), darı (*Panicum*), kuş yemi (*Setaria*) ve köpek dişi otu (*Echinochloa* spp.) gibi Poaceae familyasına ait birçok bitki türünde enfeksiyon oluşturabilmektedir (Chalupníková et al., 2017; Dráb et al., 2014; French ve Stenger, 2002).

WSMV enfeksiyonu, tahıl üretiminde büyük ekonomik zararlara neden olabilmekte ve verim kaybı hafiften tam ürün kaybına kadar değişebilmektedir (French ve Stenger, 2003). Bu nedenle, virüse karşı dayanıklı buğday çeşitlerinin geliştirilmesi, verimli üretim açısından kritik bir rol oynamaktadır. Nitekim, ıslah çalışmaları sayesinde geliştirilen dayanıklı çeşitler üretimi artırmada etkili olmuştur (Price et al., 2010).

Bu virüsün bitki patolojisi alanındaki önemi ve dünya genelinde sebep olduğu ekonomik kayıplar göz önünde bulundurulduğunda, WSMV üzerine yapılacak kapsamlı değerlendirmeler büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, WSMV'nin biyolojisi, genom yapısı, vektör ile taşınım mekanizması, konukçu spektrumu, hastalık döngüsü ve semptomları, tanı yöntemleri, genetik çeşitliliği, konukçu direnci ve entegre mücadele stratejileri üzerine güncel bilgileri içeren bir derleme gereklidir.

1.3 Tomato leaf curl New Delhi virus (ToLCNDV)- Domates yaprak kıvrılma New Delhi Virüsü

Tomato leaf curl New Delhi virüsü (ToLCNDV), Geminiviridae familyasına bağlı Begomovirus cinsinde yer alan çift segmentli bir begomovirus türüdür. Doğal ortamda beyaz sinek (*Bemisia tabaci*) aracılığıyla dolaşıcı ve kalıcı bir şekilde taşınmaktadır (Brown vd. 2012). Özellikle Hindistan'ın kuzeyinde, domates (*Solanum lycopersicum*) üretiminde büyük ekonomik kayıplara yol açan bu virüs, ciddi zararlara neden olmaktadır. Son on yılda yapılan araştırmalar, ToLCNDV'nin yalnızca domatesle sınırlı kalmayıp, diğer sebze ve lif bitkilerine de yayıldığını ve Eski Dünya'da birçok ekonomik

öneme sahip türe tehdit oluşturduğunu ortaya koymuştur (Mansoor vd. 1997). Hindistan yarımadasında domates tarımını kısıtlayan en önemli etmenlerden biri olan bu virüs, bölgede yaygın görülen ve ekonomik etkisi yüksek hastalıklara neden olmaktadır. (Varma ve Malathi, 2003; Ziadi vd. 2016).

Başlangıçta Hindistan, Pakistan ve Bangladeş gibi Güney Asya ülkelerinde sınırlı kalan ToLCNDV salgınları, zamanla Tayland, Endonezya ve Tayvan gibi Güneydoğu ve Doğu Asya ülkelerine de ulaşmıştır (Moriones vd. 2017). Ancak son yıllarda bu virüs, hem konukçu yelpazesini genişletmiş hem de yeni coğrafi bölgelere hızla yayılmıştır (Moriones vd. 2017). 2012 yılından itibaren İran'da tespit edilmesiyle birlikte, Orta Doğu'dan Batı Akdeniz Havzası'na doğru batıya yayılmaya başlamış, özellikle İspanya'da sera ve açık alanlarda yetiştirilen kabakgil ürünlerinde ağır hastalık salgınlarıyla kendini göstermiştir (Yazdani-Khameneh vd. 2016; Fortes vd. 2016). Takip eden yıllarda Tunus ve İtalya'da da ToLCNDV enfeksiyonları rapor edilmiş; bu bölgelerde salatalık (*Cucumis sativus*), kavun (*Cucumis melo*) ve kabak (*Cucurbita pepo*) gibi kabakgil türlerinde enfeksiyonlar gözlenmiştir (Mnari-Hattab vd. 2015; Panno vd. 2016). İtalya'daki izolatların, İspanya'da tespit edilenlerle genetik açıdan yakın akraba olduğu belirlenmiştir (Mnari-Hattab vd. 2015; Panno vd. 2016). Yapılan dizi analizleri, Batı Akdeniz'de yayılan bu izolatların, ToLCNDV'nin oldukça çeşitli popülasyonları arasındaki rekombinasyonlar sonucu ortaya çıkan yeni bir suşu (ToLCNDV-ES) temsil ettiğini göstermektedir (Fortes vd. 2016).

Eski Dünya'da, birçok önemli hastalık kompleksinin oluşumunda monopartit begomovirüslerin rol oynadığı iyi bilinmektedir (Moriones vd. 2017). Ancak ToLCNDV, bu tabloya istisna oluşturarak, farklı bitki familyalarına ait türlerde hastalıklara neden olduğu bilinen tek bipartit begomovirüs olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Cucurbitaceae, Euphorbiaceae, Fabaceae, Malvaceae ve en önemlisi Solanaceae familyalarındaki bitkiler, ToLCNDV enfeksiyonlarından etkilenmektedir (Zaidi vd. 2016). İlk tespitler solanaceous bitkilerde yapılmış olsa da, ilerleyen yıllarda kabakgillerde de ciddi zararlar bildirilmiştir. Domatesin yanı sıra, birçok sebze ve lif bitkisinde de zarara yol açtığı rapor edilmiş; hatta yabancı otlarda da enfeksiyonlar tespit edilmiştir. Bugüne kadar Bangladeş, Hindistan, Endonezya, İran, İtalya, Malezya, Pakistan, Sri Lanka, İspanya, Tayvan, Tayland ve Tunus'ta 43 farklı bitki türünde ToLCNDV enfeksiyonu bildirilmiştir (Chakraborty, 2008).

ToLCNDV'nin solanaceous bitkilerde domates yaprak kıvrıcıklık hastalığına neden olduğu ilk kez 1995 yılında Hindistan'da raporlanmıştır (Chakraborty, 2008). Bunu takiben, 1996-1998 yılları arasında Tayland'da kavun (*Cucumis melo*), salatalık (*C. sativus*), su kabağı (*Lagenaria siceraria*) ve sünger kabağı (*Luffa cylindrica*) bitkilerinde; Pakistan'da ise karaçalı (*Solanum nigrum*) üzerinde ToLCNDV enfeksiyonları tespit edilmiştir (Chakraborty, 2008; Ito vd. 2008). Zamanla virüs, Hindistan alt kıtasının farklı bölgelerine yayılmış ve konukçu yelpazesi dikkate değer şekilde genişlemiştir. 2000-2010 yılları arasında, bamya (*Abelmoschus esculentus*), Ageratum türleri, biber (*Capsicum annuum*), papaya (*Carica papaya*), karpuz (*Citrullus lanatus*), kabak (*Cucurbita pepo*), guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), havuç (*Daucus carota*), keten hibiskusu (*Hibiscus cannabinus*), hint yağı bitkisi (*Jatropha* spp.), acı kabak (*Momordica charantia*), patlıcan (*Solanum melongena*) ve patates (*Solanum tuberosum*) gibi çok sayıda türde enfeksiyonları bildirilmiştir (Tahir vd. 2005; Sivalingam vd. 2011; Pratap vd. 2011; Kumar vd. 2015; Venkataravanappa vd. 2014). Buna ek olarak, Hindistan ve Pakistan'da kış kabağı (*Benincasa hispida*), pervane çiçeği (*Catharanthus roseus*), sirken otu (*Chenopodium album*), yabancı kavun (*Coccinia grandis*), yasemin (*Jasminum multiflorum*), haşhaş (*Papaver somniferum*), *Sauropus androgynus* ve *Trichosanthes cucumerina* gibi farklı bitkilerde de ToLCNDV enfeksiyonları tespit edilmiştir (Roy vd. 2013; Shih vd. 2013). Özellikle 2013-2015 yılları arasında, Pakistan'da pamuk yaprak kıvrıcıklık hastalığı ile ToLCNDV birlikteliği rapor edilmiş ve bu durum, pamukta hastalık oluşturan diğer monopartit begomovirüslerle birlikte ToLCNDV'nin de pamuk tarımı için ciddi bir tehdit olabileceğini ortaya koymuştur (Moriones vd. 2017).

İran'da, ToLCNDV ve domates sarı yaprak kıvrıcıklık virüsünün (TYLCV) *Chrozophora hierosolymitana* ve domates bitkilerinde birlikte enfeksiyon oluşturduğu ilk kez Fazeli ve arkadaşları tarafından raporlanmıştır (Fazeli vd. 2009). 2012-2013 yıllarında ise ToLCNDV, İspanya'da kabakgillerde görülen yaprak kıvrıcıklık hastalığı ile ilişkilendirilmiştir. Takip eden yıllarda, Tunus'ta salatalık, kavun ve kabakta, İtalya'da ise kabakta şiddetli salgınlara yol açtığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, ToLCNDV, başlangıçta Güney Asya'ya özgü bir patojenken, kısa sürede konakçı çeşitliliği ve coğrafi yayılımını önemli ölçüde artırarak Eski Dünya'nın birçok bölgesinde ekonomik kayıplara yol açan ciddi

bir tehdit haline gelmiştir. Hem solanaceous hem de kabakgiller başta olmak üzere çok sayıda bitki türünü enfekte eden bu çift segmentli begomovirüs, özellikle sera ve açık tarım alanlarında yaygınlaşmakta ve farklı coğrafyalarda yeni suşların ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. ToLCNDV'nin hızlı yayılımı ve geniş konakçı yelpazesi, entegre mücadele stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmakta; bu nedenle virüsün moleküler çeşitliliği, yayılım mekanizmaları ve ekolojik etmenlerin daha kapsamlı şekilde incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, uydu DNA'ların hastalık şiddetini ve virüsün bulaşma kapasitesini etkileyebilmesi, hastalık yönetimi açısından ek araştırma alanları yaratmaktadır. Bu bilgiler ışığında, ToLCNDV ile mücadelede erken teşhis, dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi ve entegre kontrol yöntemlerinin uygulanması kritik öneme sahiptir.

SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Bu çalışma, ToBRFV, WSMV ve ToLCNDV gibi bitki virüslerinin çevresel değişimler, ticaret ve tarımsal uygulamalar nedeniyle hızla yayılan artan tehditlerini ortaya koymaktadır. Bu virüsler yalnızca ekonomik kayıplara yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda ekosistemleri ve gıda güvenliğini de olumsuz etkilemektedir. Moleküler epidemiyoloji ve CRISPR tabanlı tanı teknikleri gibi ileri teknolojiler umut vadetse de, bu teknolojilerin başarısı küresel politikaların yerel agroekolojik stratejilerle uyumlu hale getirilmesine bağlıdır. Geçmiş salgınlardan alınan dersler ile modern bilimsel araçların birleşimi, bu tehditleri azaltmak için proaktif ve disiplinlerarası bir yaklaşım gerektirmektedir. Sürdürülebilir yönetim; güçlü izleme sistemleri, dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi ve uluslararası iş birliğini zorunlu kılmaktadır. Bu patojenlere karşı verilen mücadele sadece bilimsel değil, aynı zamanda onların yayılımını artıran sistematik eşitsizlikler ve kısa vadeli politikalarla da mücadeledir.

KAYNAKÇA

- Alon, D. M., Hak, H., Bornstein, M., Pines, G., & Spiegelman, Z. (2021). Differential detection of the tobamoviruses tomato mosaic virus (ToMV) and tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) using CRISPR-Cas12a. *Plants*, 10(6), 1256. <https://doi.org/10.3390/plants10061256>
- Avni, B., Gelbart, D., Sufrin-Ringwald, T., Zinger, A., Chen, L., Machbash, Z., et al. (2021). Tomato genetic resistance to tobamoviruses is compromised. *Acta Horticulturae*, 1316, 89–98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1316.13>
- Brown, J. K., Fauquet, C. M., Briddon, R. W., Zerbini, F. M., Moriones, E., & Navas-Castillo, J. (2012). Family Geminiviridae. In A. M. Q. King, M. J. Adams, E. B. Carstens, & E. J. Lefkowitz (Eds.), *Virus taxonomy: 9th report of the International Committee on Taxonomy of Viruses* (pp. 351–373). Elsevier Academic Press.
- Creager, A. N. H. (2002). *The life of a virus: Tobacco mosaic virus as an experimental model, 1930–1965*. University of Chicago Press.
- Chamberlain, D., & Ingram, D. S. (1997). Tulip breaking: The virus, the myth and the history. *Endeavour*, 21(3), 100–106. [https://doi.org/10.1016/S0160-9327\(97\)01023-4](https://doi.org/10.1016/S0160-9327(97)01023-4)
- Chakraborty, S. (2008). Tomato leaf curl viruses from India (Geminiviridae). In B. W. J. Mahy & M. H. V. Van Regenmortel (Eds.), *Encyclopedia of Virology* (pp. 124–133). Elsevier.
- Chanda, B., Gilliard, A., Jaiswal, N., & Ling, K.-S. (2021). Comparative analysis of host range, ability to infect tomato cultivars with Tm-22 gene, and real-time reverse transcription PCR detection of tomato brown rugose fruit virus. *Plant Disease*, 105(12), 3643–3652. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-20-2734-RE>
- Dombrovsky, A., & Smith, E. (2017). Seed transmission of tobamoviruses: Aspects of global disease distribution. In J. C. Jimenez-Lopez (Ed.), *Advances in Seed Biology* (pp. 233–260). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66699>
- EPPO. (2021). PM 7/146 (1) Tomato brown rugose fruit virus. *EPPO Bulletin*, 51(1), 178–197. <https://doi.org/10.1111/epp.12726>

- Esmailzadeh, F., Santosa, A. I., Çelik, A., & Koolivand, D. (2023). Revealing an Iranian isolate of tomato brown rugose fruit virus: Complete genome analysis and mechanical transmission. *Microorganisms*, 11(10), 2434. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11102434>
- Fazeli, R., Heydarnejad, J., Massumi, H., Shaabani, M., & Varsani, A. (2009). Genetic diversity and distribution of tomato-infecting begomoviruses in Iran. *Virus Genes*, 38, 311–319. <https://doi.org/10.1007/s11262-009-0340-1>
- Fidan, H., Sarikaya, P., & Calis, O. (2019). First report of tomato brown rugose fruit virus on tomato in Turkey. *New Disease Reports*, 39, 18. <https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2019.039.018>
- Fidan, H., Sarikaya, P., Yildiz, K., Topkaya, B., Erkiş, G., & Calis, O. (2021). Robust molecular detection of the new tomato brown rugose fruit virus in infected tomato and pepper plants from Turkey. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(8), 2170–2179. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63631-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63631-5)
- Fortes, I. M., Sánchez-Campos, S., Fiallo-Olivé, E., Díaz-Pendón, A. J., Navas-Castillo, J., & Moriones, E. (2016). A novel strain of tomato leaf curl New Delhi virus has spread to the Mediterranean basin. *Viruses*, 8(11), 307. <https://doi.org/10.3390/v8110307>
- Fry, W. E. (2008). *Phytophthora infestans*: The plant (and R gene) destroyer. *Molecular Plant Pathology*, 9(3), 385–402. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2007.00465.x>
- Güller, A., Usta, M., & Randa-Zelyüt, F. (2023). Genetic diversity and population structure of tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) variants from Antalya province, Turkey. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(3), 13356. <https://doi.org/10.15835/nbha51313356>
- Ito, T., Sharma, P., Kittipakorn, K., & Ikegami, M. (2008). Complete nucleotide sequence of a new isolate of tomato leaf curl New Delhi virus infecting cucumber, bottle gourd and muskmelon in Thailand. *Archives of Virology*, 153(3), 611–613.
- Jones, R. A. C. (2021). Global plant virus disease pandemics and epidemics. *Plants*, 10(2), 233. <https://doi.org/10.3390/plants10020233>

- Karanfil, A., Randa-Zelyüt, F., & Korkmaz, S. (2023). Population structure and genetic diversity of tobacco mild green mosaic virus variants in Western Anatolia of Turkey. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 125, 102008. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102008>
- Kumar, R. V., Singh, A. K., Singh, A. K., Yadav, T., Basu, S., Kushwaha, N., Chattopadhyay, B., & Chakraborty, S. (2015). Complexity of begomovirus and betasatellite populations associated with chilli leaf curl disease in India. *Journal of General Virology*, 96(11), 3157–3172. <https://doi.org/10.1099/vir.0.000226>
- Langham, M. A. C., Doxtader, D. C., Haley, S. D., Kalsbeck, S., Little, R. S., & Ibrahim, A. M. (2001). Yield and growth reductions in winter wheat infected with wheat streak mosaic virus. *Phytopathology*, 91, S52.
- Luria, N., Smith, E., Reingold, V., Bekelman, I., Lapidot, M., Levin, I., et al. (2017). A new Israeli tobamovirus isolate infects tomato plants harboring Tm-22 resistance genes. *PLoS ONE*, 12(1), e0170429. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170429>
- Mansoor, S., Khan, S. H., Saeed, M., Bashir, A., Zafar, Y., & Malik, K. A. (1997). Evidence for the association of a bipartite geminivirus with tomato leaf curl disease in Pakistan. *Plant Disease*, 81(8), 958. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.8.958A>
- McKinney, H. H. (1937). *Mosaic diseases of wheat and related cereals*. USDA Circular No. 442, 1–23. Retrieved from <https://archive.org/stream/mosaicdiseasesof442mcki>
- Menzel, W., Knierim, D., Winter, S., Hamacher, J., & Heupel, M. (2019). First report of tomato brown rugose fruit virus infecting tomato in Germany. *New Disease Reports*, 39, 1. <https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2019.039.001>
- Mnari-Hattab, M., Zammouri, S., Belkadhi, M., Doña, D. B., Ben Nahia, E., & Hajlaoui, M. R. (2015). First report of tomato leaf curl New Delhi virus infecting cucurbits in Tunisia. *New Disease Reports*, 31, 21. <https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2015.031.021>
- Moriones, E., Praveen, S., & Chakraborty, S. (2017). Tomato leaf curl New Delhi virus: An emerging virus complex threatening vegetable and fiber crops. *Viruses*, 9(10), 264. <https://doi.org/10.3390/v9100264>

- Panno, S., Iacono, G., Davino, M., Marchione, S., Zappardo, V., Bella, P., et al. (2016). First report of tomato leaf curl New Delhi virus affecting zucchini squash in an important horticultural area of southern Italy. *New Disease Reports*, 33, 6.
- Pratap, D., Kashikar, A., & Mukherjee, S. (2011). Molecular characterization and infectivity of a tomato leaf curl New Delhi virus variant associated with newly emerging yellow mosaic disease of eggplant in India. *Virology Journal*, 8, 305. <https://doi.org/10.1186/1743-422X-8-305>
- Randa-Zelyüt, F., Fox, A., & Karanfil, A. (2023). Population genetic dynamics of southern tomato virus from Turkey. *Journal of Plant Pathology*, 105, 211–224. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01263-3>
- Roy, A., Spoorthi, P., Panwar, G., Bag, M.K., Prasad, T., Kumar, G., Gangopadhyay, K., & Dutta, M. (2013). Molecular evidence for occurrence of *Tomato leaf curl New Delhi virus* in ash gourd (*Benincasa hispida*) germplasm showing a severe yellow stunt disease in India. *Indian Journal of Virology*, 24, 74–77.
- Salem, N., Mansour, A., Ciuffo, M., Falk, B. W., & Turina, M. (2016). A new tobamovirus infecting tomato crops in Jordan. *Archives of Virology*, 161, 503–506. <https://doi.org/10.1007/s00705-015-2697-3>
- Shih, S.L., Tsai, W.S., Lee, L.M., & Kenyon, L. (2013). Molecular characterization of begomoviruses infecting *Sauropus androgynus* in Thailand. *Journal of Phytopathology*, 161, 78–85. <https://doi.org/10.1111/jph.12032>
- Sivalingam, P. N., Sumiya, K. V., & Malathi, V. G. (2011). Carrot as a new host for a begomovirus: Yellow mosaic disease of carrot reported in India. *New Disease Reports*, 23, 34.
- Syller, J. (2012). Facilitative and antagonistic interactions between plant viruses in mixed infections. *Molecular Plant Pathology*, 13(2), 204–216. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00746.x>
- Tahir, M., & Haider, M. S. (2005). First report of tomato leaf curl New Delhi virus infecting bitter melon in Pakistan. *Plant Pathology*, 54(6), 807. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01236.x>
- Varma, A., & Malathi, V. G. (2003). Emerging geminivirus problems: A serious threat to crop production. *Annals of Applied Biology*, 142(2), 145–164. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00240.x>

- Venkataravanappa, V., Lakshminarayana, R. C., Jalali, S., & Krishna, R. M. (2014). Association of tomato leaf curl New Delhi virus DNA-B with bhendi yellow vein mosaic virus in okra showing yellow vein mosaic disease symptoms. *Acta Virologica*, 59(2), 125–131.
- Yazdani-Khameneh, S., Aboutorabi, S., Shoori, M., Aghazadeh, A., Jahanshahi, P., Golnaraghi, A., & Maleki, M. (2016). Natural occurrence of tomato leaf curl New Delhi virus in Iranian cucurbit crops. *Plant Pathology Journal*, 32(3), 201–208. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.01.2016.0011>
- Zaidi, S. S. S., Martin, D. P., Amin, I., Farooq, M., & Mansoor, S. (2016). Tomato leaf curl New Delhi virus: A widespread bipartite begomovirus in the territory of monopartite begomoviruses. *Molecular Plant Pathology*, 18(7), 901–911. <https://doi.org/10.1111/mpp.12442>

BÖLÜM 4

TOPRAK GELİŞİMİNDE MİKROORGANİZMALARIN ROLÜ

Öğr. Gör. Dr. Özge KAYGUSUZ İZGÖRDÜ^{1*},
Öğr. Gör. Dr. Osman TÜRKYILMAZ²,
Öğr. Gör. Dr. Gülçin ÇETİN KILIÇASLAN³,
Prof. Dr. Cihan DARCAN⁴

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16369774>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye. ozge.kaygusuz@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar),
Orcid ID: 0000-0002-3652-4266

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye. osman.turkyilmaz@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0002-3152-9439

³ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye. gulcin.cetin@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0002-9625-224X

⁴ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Bilecik, Türkiye. cihan.darcen@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0003-0205-3774

GİRİŞ

Yer kabuğunun en üst katmanı olan toprak, mineral parçacıklar, organik madde, su, hava ve canlı organizmalardan oluşan üç boyutlu mimariye sahip, dinamik ve karmaşık bir sistemdir (Vogel vd., 2021). Bu katman sayı ve biyokütle bakımından dünyadaki biyoçeşitliliğin çoğunu barındıran mikroorganizma ağırlıklı bir rezervuardır. Toprak mikroorganizmaları genellikle tek hücreli olan veya hücre kolonileri halinde bulunan ve çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük olan yaşam formlarıdır. Bu mikroskobik yaşam formları bakteri, mantar, alg ve protozoa gibi çok sayıda grupları içermektedir.

Toprakta bulunan mikroorganizmalar sayıca ve biyokütle açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Bakteriler, bir toprak parçası içerisinde sayıca en çok bulunan mikroorganizma grubunu oluşturmaktadır. Bir gram toprak yaklaşık olarak 10^8 – 10^9 bakteri içermektedir. Ancak, biyokütle açısından değerlendirildiğinde, mantarlar daha düşük sayıda (10^5 – 10^6) olmalarına rağmen, 100 – 1500 g/m² aralığında değişen yüksek biyokütleleri ile toprak ekosisteminde bakterilerden 3 kat daha fazla yer tutarlar. Aktinomisetler, hem sayı (10^7 – 10^8) hem de biyokütle (40 – 500 g/m²) açısından bakterilere benzer düzeydedir. Toprakta diğerlerine kıyasla daha az bulunan algler (10^4 – 10^5), biyokütle bakımından 1 – 50 g/m² arasında değişen değerlere sahiptir. Protozoa ve nematodlar ise hem popülasyon yoğunlukları (sırasıyla 10^3 – 10^4 ve 10^2 – 10^3) hem de biyokütle miktarları bakımından daha değişken bir dağılım sergiler (Bhattarai vd., 2015). Bu farklılıklar, mikroorganizmaların toprakta sahip oldukları ekolojik rollerin çeşitliliğini yansıtmakta ve toprak sağlığının korunmasında her bir grubun özgün katkısının bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Toprak mikroorganizmaları, toprak ekosisteminin işleyişinde ve gelişiminde hayati roller üstlenen çok çeşitli bir canlı grubunu temsil eder. Bakteriler, mantarlar, aktinomisetler, algler ve diğer ana grupların her biri, kendine özgü özellikleri ve işlevleriyle toprak gelişimine ortak bir şekilde katkıda bulunurlar. Toprak oluşumu, organik madde mineralizasyonu ve humifikasyonu, çevresel kirleticilerin biyobozunması, toprak pH'nın düzenlenmesi, bitkilerin abiyotik streslere toleransının artırılması ve toprağın hidrolik özelliklerinin iyileştirilmesi gibi süreçlerin tamamı toprak mikroorganizmalarının rol almasıyla gerçekleşmektedir (Wang vd., 2024). Bu çok yönlü roller, mikroorganizmaların yalnızca biyokimyasal döngülerde değil,

aynı zamanda toprak oluşumu ve sağlığı üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Mikroorganizmaların bu temel işlevleri, toprak sağlığının sürdürülebilirliğini sağlamanın yanı sıra bitki gelişimini de doğrudan etkilemektedir (Chen vd., 2024). Dolayısıyla, bu mikroorganizmaların, tarımsal üretkenliğin artırılması ve ekosistemlerin devamlılığı açısından temel bileşenler olduğu bilimsel olarak kabul edilmektedir. Bu bölümün temel amacı, bu görünmez ama etkili canlıların toprak gelişimindeki rollerini ortaya koymaktır. Toprak mikroorganizmalarının bu rollerini anlamak yalnızca bilimsel çalışmalar açısından değil sürdürülebilir tarım ve çevre yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi bakımından oldukça önemlidir.

1. TOPRAK OLUŞUMUNDA MİKROORGANİZMALARIN ETKİSİ

Toprak oluşumu (Pedogenez), ana kayaların ayrışmasıyla başlar ve bu süreçte fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörler birlikte etki eder. Bakteriler, mantarlar, aktinomisetler ve algler bu ayrışma süreçlerinin her birine önemli katkılar sağlamaktadır. Geleneksel olarak, kaya ve mineral ayrışmasının yalnızca abiyotik (fiziksel-kimyasal) etkenlerle gerçekleştiği düşünülse de, son yıllarda yapılan araştırmalar, bakteri ve mantar gibi canlıların da bu süreci hızlandırabildiğini göstermiştir (Chen vd., 2024; Wild vd., 2022). Bu tür biyolojik ayrışma süreçleri, binlerce yıl içinde anakayanın ufalanarak regolit ve nihayetinde toprak horizonlarına dönüşmesinde kritik öneme sahiptir (Ribeiro vd., 2020).

Toprak oluşumunda kayaların üzerine yerleşen öncü organizmalardan biri likenlerdir. Likenler, fiziksel ve kimyasal ayrıştırıcı etkiye sahiptir. Likenlerin kaya yüzeyine tutunmasıyla birlikte mantara ait hiflerin kayaya penetrasyonu minerallerin fiziksel parçalamasına sebep olur. Ayrıca liken içerisindeki simbiyont fotosentetik algler tarafından sağlanan karbon, mantarların ve diğer mikroorganizmaların gelişimini destekler. Bu durumun bir sonucu olarak da gelişen mikroorganizmalar ortama sitrik asit, oksalik asit ve karbonik asit gibi organik asitler salgılayıp pH'ı düşürerek minerallerin kimyasal çözünmesini hızlandırır (Ribeiro vd., 2020). Sonuç olarak, likenlerin bulunduğu kaya yüzeyinin altında belirgin bir şekilde zayıflamış, renk değiştirmiş bir alterasyon tabakası oluşur. Bu tabaka, likenlerin içerdği bakteri, mantar, aktinomiset ve alglerin ortak ayrıştırıcı faaliyetinin ürünüdür. Ayrıca

mantarlar gibi flamentöz bir mikroorganizma olan aktinomisetler de hiflerini kayaların çatlaklarına doğru uzatarak fiziksel basınç uygular ve kayayı mekanik olarak parçalamaya yardımcı olur. Kısacası mantarlar, bakteriler, aktinomisetler, siyanobakteriler, arkeler ve algler dahil olmak üzere birçok organizma kayaların ilk ayrışmasında rol oynayan güçlü ajanlardır. Bu mikroorganizmalar doğrudan veya dolaylı olarak minerallerin ayrışmasına, çözünmesine, hidrasyonuna ve ikincil mineral oluşumuna destek olur (Jackson, 2015; Kaviya vd., 2019; Ribeiro vd., 2020; Zaharescu vd., 2020).

Kaya ve minerallerin ayrışmasında rol oynayan bir başka etmense bakteriler tarafından oluşturulan biyofilm tabakalarıdır. Biyofilm oluşumu, mikroorganizmaların yüzeylere yerleşmesi ve biyolojik aşındırma süreçlerinin başlaması açısından kritik bir adımdır. Yüzeylere tutunmuş bakterilerin, planktonik (serbest yüzen) hücrelere kıyasla mineral yüzeylerden daha fazla element çözünmesini sağladığı bilinmektedir (Ahmed & Holmström, 2015). Ayrıca biyofilm; organik asitler, sideroforlar, şelat oluşturan diğer bileşikler ve aşınmayı tetikleyen maddelerin mikroorganizma ile mineral yüzey arasındaki bölgede birikmesine olanak tanır. Bu bütünsel yapı, farklı mikroorganizmalar ve biyolojik süreçlerin bir arada çalışarak mineral çözünmesini sinerjik bir şekilde artırmasına olanak sağlar (Finlay vd., 2020).

2. ORGANİK MADDELERİN PARÇALANMASI VE HUMUS OLUŞUMUNA KATKI

Topraktaki organik maddenin parçalanma (çürüme) süreci, bitki ve hayvan atıklarının mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılarak basit bileşiklere ve humus adı verilen kararlı organik maddeye dönüştürülmesini içerir. Humus, toprakta mikroorganizmaların ölü organik artıkları parçalayıp dönüştürmesi sonucu oluşan, koyu renkli ve kararlı yapıda bir maddedir (Nivethadevi vd., 2021). Organik artıklar mikroorganizmalar tarafından parçalanırken karbondioksit (CO₂), su ve bitki besin elementleri (ör. azot, fosfor) açığa çıkar geriye kalan kompleks polimerler ise tam olarak parçalanmayıp toprakta birikerek humusu oluşturur (Aguilar-Paredes vd., 2023; Trautmann & Olynciw, 1996). Eğer mikroorganizmalar organik maddenin ayrıştırılmasındaki işlevlerini yerine getirmeseydi, doğada ölen bitki ve hayvan kalıntıları zamanla birikerek büyük organik yığınlar dönüşür, bu durum da ekosistemlerdeki madde döngüsünü sekteye uğratarak bitkilerin hayati besin elementlerine

erişimini ciddi ölçüde kısıtlardı. Dolayısıyla çürüme ve humuslaşma, ekosistemlerin sürekliliği ve verimli toprak oluşumu için elzem süreçlerdir. Bakteriler, mantarlar ve aktinomisetler organik madde dönüşümünün başlıca organizmalarıdır.

Bakteriler, toprak ve kompost içinde sayı ve aktivite bakımından en baskın gruptur. Şeker ve protein gibi kolay parçalanabilir bileşikler hızla tüketerek CO₂ ve basit besin formlarına dönüştürür. Bir gram toprakta veya kompostta milyarlarca bakteri bulunur ve sahip oldukları çeşitli enzimler sayesinde çok farklı organik maddelerin kimyasal olarak parçalanmasında görev alır (Nemet vd., 2021; Trautmann & Olynciw, 1996).

Mantarlar (küfler ve mayalar), selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi kompleks bitki polimerlerinin ayrıştırılmasında kritik rol oynar. Mantarlar tarafından salgılanan selülaz, ligninaz gibi enzimler, odun ve yaprak gibi dayanıklı materyallerin yapısını bozarlar. Toprak ve kompostta bulunan bakterilerden farklı olarak mantarlar, kuru, asidik veya azotca fakir ortamlarda dahi büyüyerek odunsu kalıntıları parçalayabilir ve böylece bakterilerin ayrışma sürecini devam ettirebilmesini sağlar (Andlar vd., 2018; El Fels vd., 2024; Trautmann & Olynciw, 1996).

Aktinomisetler ise filamentöz (ipliksi) yapıda, mantar benzeri bakterilerdir ve özellikle ayrışmanın ileri evrelerinde devreye girerler. Toprağa toprak kokusunu veren *Streptomyces* gibi aktinomiset türleri, selüloz, lignin, kitin ve polisakkarit gibi dirençli organik bileşikler parçalayabilen enzimlere sahiptir. Bu sayede kompost ve toprakta odunsu ve mumlu kalıntıları, gazete kağıdı gibi zor ayrışan maddeleri dahi kimyasal olarak parçalayarak humusun son aşamada oluşumuna katkı yaparlar (El Fels vd., 2024; Ödemiş vd., 2021; Zhao vd., 2017).

Organik maddenin mikroorganizmalarca dönüşümü kademeli olarak ilerler. Kompostlama süreci boyunca, farklı mikrobiyal topluluklar her fazda geçerli olan beslenme ve çevre koşullarına göre birbirini takip eder. Örneğin kompostlaşma süreci, farklı sıcaklık evrelerinde farklı mikroorganizma topluluklarının faaliyet göstermesiyle gerçekleşir. İlk olarak mezofilik evre denen ılıman aşamada mezofilik bakteriler ve mantarlar basit şekerler ve amino asitler gibi kolay ayrışan bileşikler hızla metabolize eder. Bu metabolizma ısınmaya yol açar ve yığın sıcaklığı yükseldikçe ikinci aşamada termofilik evre başlar. Isıyı seven termofilik bakteriler ve mantarlar devreye girerek selüloz,

hemiselüloz gibi kompleks karbonhidratları, protein ve yağ gibi molekülleri parçalarlar. Yüksek sıcaklık (50-60°C üzeri) patojen mikroorganizmaları öldürürken ayrışma hızını da artırır. Ancak 65°C'yi aşan sıcaklıklarda ayrıştırıcı mikroorganizmaların çoğu zarar görür. Son olarak yığın soğumaya başladığında üçüncü evre olan olgunlaşma/kür evresi gerçekleşir. Mezofilik mikroorganizmalar yeniden baskın hale gelerek geriye kalan en dirençli maddelerin yavaş humifikasyonunu tamamlar. Bu süreçlerin sonunda kompost, kararlı, koyu renkli ve besince zengin humusa dönüşmüştür. Kontrollü kompostlaşma, doğada toprakta gerçekleşen humus oluşumunun hızlandırılmış bir modelidir. Mikroorganizmalar organik atıkları parçalayarak karbondioksit, su, ısı ve humus adı verilen stabil son ürünü oluştururlar (Aguilar-Paredes vd., 2023; Erdem vd., 2015; Nemet vd., 2021). Ayrıca humus güneş ışığı ile parçalanarak fotooksidatif stres oluşumunu ve dolayısı ile mikroorganizmalar üzerinde olumsuz sonuçlar meydana gelmesine neden olmaktadır (Darcın, C 2012) .

3. BİYOREMEDIASYON

Biyoremediasyon, çevresel kirleticilerin etkilerini ortadan kaldırmak veya azaltmak için bitki ya da mikroorganizmaların kullanılmasıdır (Ayıllara & Babalola, 2023). Mikroorganizmalar, bitkilere kıyasla daha hızlı büyümeleri ve kolayca manipüle edilebilmeleri nedeniyle biyoremediasyon ajanları olarak daha fazla kullanılmaktadır. Biyoremediasyonun temel amacı, çevredeki toksik maddeleri daha az toksik hale getirmek ya da zararsız maddelere dönüştürmektir. Fiziksel ve kimyasal arıtım yöntemlerine kıyasla, biyoremediasyon genellikle daha uygun maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir seçenek oluşturmaktadır. Kirleticilerin bulunduğu bölgede işlenmesi ile birlikte taşıma ihtiyacı ortadan kalkmış olur ve zararlı yan ürünle çevreye zarar verilmez. Böylece, kirlenmiş toprakların geri kazanılması, sağlık risklerinin azaltılması, toprak sağlığı ve biyoçeşitliliğin korunması sağlanır.

Biyoremediasyon sürecinde çok çeşitli mikroorganizmalar kullanılmaktadır. Bakteriler hızlı üreme yetenekleri, geniş metabolik çeşitlikleri ve farklı çevresel koşullara hızlı bir şekilde adapte olabilmeye yetenekleri ile biyoremediasyonda en sık kullanılan mikroorganizmalardır. *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Phormidium* ve *Rhodococcus* gibi cinsler petrol, pestisit ve ağır metal gibi birçok kirleticinin temizlenmesinde

kullanılmaktadır (Kour vd., 2022). Mantarlar ise sağlam morfolojileri ve çeşitli metabolik kapasiteleri nedeniyle biyoremediasyonda önemli bir rol oynayan ve sıklıkla kullanılan bir diğer mikroorganizma gurubudur. *Ceriporiopsis*, *Hirschioporus*, *Inonotus*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium* ve *Lecanicillium* gibi çok sayıda mantar cinsi organik kirleticiler, tekstil boyaları, petrol, poliaromatik hidrokarbonlar, farmasötikler, kişisel bakım ürünleri ve pestisitler gibi farklı kirleticilerin temizlenmesinde kullanılmıştır (Deshmukh vd., 2016). Aktinomisetler de çeşitli kirleticilerin giderilmesinde önemli bir yere sahiptir. Karmaşık polimerlerin ve ksenobiyotiklerin parçalanmasında *Streptomyces* ve *Rhodococcus* cinsleri önemli bir potansiyel göstermiştir (Mawang vd., 2021).

Biyoremediasyon çalışmalarının başarısı birçok çevresel ve biyolojik faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden birisi sıcaklıktır ve biyoremediasyonun etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri için gerekli olan sıcaklık aralıkları birbirinden farklılık göstermektedir. Birçok organizma için optimum sıcaklık aralığı 25-45 °C olsa da mikroorganizmaların sıcaklık isteklerine göre birçok farklı gruba ayrıldığı bilinmektedir. Bu nedenle biyoremediasyon çalışmalarında ortam sıcaklığı ve kullanılacak olan mikroorganizmanın optimum sıcaklık değeri göz önünde bulundurulmalıdır (Kakde & Sharma, 2024). Ortamın pH değeri biyoremediasyon başarısını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Çoğu mikroorganizmanın hayatta kalması ve enzim aktivitesinin gerçekleşmesi için optimal pH değeri genellikle 6-8 aralığındadır. Dolayısıyla bu pH değerlerinden uzaklaştıkça biyoremediasyon verimliliği azalmaktadır (Obahiagbon vd., 2014). Sıcaklık ve pH gibi temel çevresel faktörlerin yanı sıra, ortamdaki oksijen varlığı da biyoremediasyon üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Aerobik veya anaerobik koşullar hangi mikroorganizmaların ve hangi bozunma yollarının aktif olacağını belirlemektedir. Örneğin organik kirleticilerin çoğu aerobik koşullar altında daha hızlı bozunmaktadır (Bala vd., 2022). Bu nedenle ortamdaki oksijen durumuna ve buna bağlı olarak çalışacak yollara dikkat edilmelidir. Ortamdaki mikroorganizmaların büyümesi için karbon, azot, fosfor gibi temel besinler gereklidir. Besin eksikliği, mikroorganizmaların metabolik aktivitelerini yavaşlatarak veya durdurarak biyoremediasyon sürecini kısıtlayabilir (Chen et al., 2019). Dolayısıyla ortamda besin maddesi varlığı da kritik bir öneme sahiptir. Bu çevresel etmenlerin yanı sıra kirletici konsantrasyonu, nem içeriği, toprak tipi ve dokusu, popülasyon yoğunluğu,

enzim aktivitesi ve mikrobiyal etkileşimler de başarıyı etkileyen etmenler içerisinde yer almaktadır (Kakde & Sharma, 2024). Sayılan bu faktörlerin tamamı biyoremediasyonun hem laboratuvar ölçeğinde hem de saha uygulamalarında verimliliğini belirleyen temel unsurlardır. Bu nedenle başarılı bir biyoremediasyon stratejisi geliştirmek için söz konusu çevresel ve biyolojik parametrelerin dikkatlice analiz edilmesi ve uygun koşulların sağlanması büyük önem taşımaktadır. Biyoremediasyon, çevresel kirlilikle mücadelede umut verici ve gelişmekte olan bir alandır. Doğal süreçleri kullanarak kirliliği giderme potansiyeli, onu gelecekte daha temiz ve sürdürülebilir bir çevre için önemli bir araç haline getirmektedir.

4. TOPRAK pH'ININ DÜZENLENMESİ

Toprak ortamı, su ve havayı içeren tüm mikrobiyal habitatların en karmaşık olanıdır (Horner-Devine vd., 2004). Bu organizmaların yalnızca çok küçük bir kısmı herhangi bir bitki veya hayvan hastalığından sorumludur. Aslında, bu mikroskobik toprak organizmalarının büyük çoğunluğu besin döngüsü, toprak işleme ve toprak sağlığı açısından oldukça faydalıdır. Bu kritik toprak özelliklerindeki önemli rolleri ve bitkilerle doğrudan etkileşimleri nedeniyle, faydalı toprak mikroorganizmaları da toprak verimliliği ve bitki beslenmesi için kesinlikle kritiktir (Sullivan vd., 2017).

pH, çok çeşitli toprak kimyasal ve biyolojik süreçlerini etkilediği için genellikle ana toprak değişkeni olarak tanımlanır (Husson, 2013). Toprak pH'sı, bitki besin maddelerinin çözünürlüğü ve mikroorganizma aktiviteleri üzerinde belirleyici bir faktördür ve bu dengenin sağlanmasında bakteriler önemli bir rol oynar (Crowley ve Alvey, 2002). Karbon, nitrojen ve kükürtün biyojeokimyasal döngüsüyle ilgili mikrobiyal aktiviteler, proton ve hidroksil iyonları üreten ve dolayısıyla toprak pH'ını etkileyen en önemli mikrobiyal süreçlerdir (Bolan ve Hedley, 2003). Karbon döngüsünde, mikrobiyal solunumla üretilen CO₂'nin toprak çözeltisinde karbonik asit (H₂CO₃) oluşturmak üzere çözünmesi, toprak asitlenmesine yol açan bir proton kaynağıdır. Son çalışmalar, toprak solunumuyla üretilen CO₂'nin yalnızca üçte birinin doğrudan atmosfere salındığını, kalan CO₂'nin ise toprak çözeltisinde çözünme, biyolojik aktiviteler ve kimyasal reaksiyonlar (örneğin, kimyasal karbonat aşınması) tarafından tüketildiğini göstermektedir (Sánchez-Cañete vd., 2018). Diğer fotosentetik ototroflara benzer şekilde siyanobakteriler,

proton pompalamayı gerektiren CO₂ fiksasyon aktiviteleri nedeniyle mikro çevrelerini alkalileştirirler (Mergelov vd., 2018). Hem serbest yaşayan hem de simbiyotik mantarlar ve bakteriler, toprak asitlenmesine katkıda bulunabilen organik asitler (örneğin, oksalat veya sitrat) üretebilir ve salgılayabilir (Gadd vd., 2014). Son zamanlarda yapılan bir çalışmada (Jones vd., 2003), araştırmacılar toprak çözeltisine giren organik asitlerin çoğunun bitkiler tarafından değil, mikroorganizmalar tarafından üretildiğini tahmin etmişlerdir. Tersine, bakteriler tarafından oksalat katabolizması, 2,5 üniteye kadar güçlü bir toprak pH artışı ile ilişkilidir (Hervé vd., 2016; Syed vd., 2020). Azot döngüsünde, nitrifikasyon sırasında bakteriler ve arkeler tarafından amonyumun nitrata oksidasyonu proton üretir ve özellikle azot gübrelemesi yapılan ekilebilir topraklarda iyi bilinen bir toprak asitleştirme sürecidir (Norton ve Ouyang, 2019). Örneğin, bir çalışma (Napieralski vd., 2019) nitrifikasyonun bir ay içinde toprak pH'nın 7,5'ten 6,4'e düşmesine neden olduğunu, buna karşın topluluk manipülasyonu yoluyla toprak nitrifikatörü *Nitrosospira* sp.'nin tükenmesinin kontrol toprağıyla karşılaştırıldığında 1 birimlik bir pH artışına yol açtığını göstermiştir (Huet vd., 2023). Buna karşılık, amonifikasyon ve denitrifikasyon proton tüketen süreçlerdir ve mol azot başına nitrifikasyonla üretilen miktarın yalnızca yarısını tüketir. Mantarlar tarafından çevresel alkalileştirme sıklıkla gözlemlenen, ancak iyi anlaşılmayan bir olgudur (Fernandes vd., 2017; Palmieri vd., 2020). Genellikle bu süreç, protein ve amino asit katabolizmasının bir yan ürünü olarak üretilen ve hiflerden salgılanan veya dışarı atılan oldukça bazik bir bileşik olan amonyak tarafından aracılık edilir (Vylkova vd., 2017). Yüzey topraklarındaki azot:kükürt oranı 8-12:1 aralığında olduğundan, kükürt döngüsünün proton ve hidroksit iyonlarının oluşumuna katkısı azot döngüsünün yaklaşık onda biri kadardır. İyi havalandırılmış topraklarda, kükürtün %90'ından fazlası genellikle organik formlarda bulunur ve organik kükürtün mineralizasyonu asitlik oluşturur (Howarth vd., 1992). Benzer şekilde, bakteriler ve mantarlar tarafından inorganik kükürt bileşiklerinin oksidasyonu da toprak asitlenmesine yol açabilir (Yang vd., 2007; Koch ve Dahl, 2018; Linder, 2018). Demir ve mangan içeren redoks reaksiyonları ve kalsiyum, magnezyum, potasyum ve fosfor içeren aşınma reaksiyonları gibi bir dizi başka biyojeokimyasal döngü de proton ve hidroksit iyonları üretebilir. Bakteriler ve mantarlar böylece toprak

pH'ını aktif olarak değiştirebilir ve bu da genellikle toprak mikrobiyal topluluklarını yapılandıran birincil faktördür (Fierer, 2017).

Toprakta yaşayan bazı bakteriler, gerçekleştirdikleri biyokimyasal süreçlerle pH değerini doğrudan etkileyebilir. Örneğin, *Nitrosomonas* ve *Nitrobacter* gibi nitrifikasyon bakterileri, amonyumun nitrata dönüşümü sırasında hidrojen iyonu salarak toprağın asitleşmesine neden olur. Buna karşılık, oksijensiz ortamlarda faaliyet gösteren denitrifikasyon bakterileri nitrati azota çevirirken toprakta bazik etki yaratabilir (Ni vd., 2023). Ayrıca, kükürt oksitleyen *Thiobacillus* türleri sülfürik asit oluşturarak toprağın pH'sını düşürürken, organik maddeyi ayrıştıran bakteriler geçici asidik bileşikler üretirler (Joshi vd., 2021). Bu süreçler hem toprağın pH dengesini şekillendirir hem de bitki gelişimi üzerinde dolaylı etkiler oluşturur. Sonuç olarak, bakteriler hem pH'yı etkileyen hem de pH'dan etkilenen canlılar olarak, toprak ekosisteminin dengesinde hayati bir rol oynar. (Gondal vd., 2021).

5. TUZLULUK STRESİNE KARŞI KORUNMA

Toprak tuzluluğu, topraktaki yüksek oranda çözünebilir tuz konsantrasyonu olarak tanımlanır ve tarımsal üretkenliği ve çevresel sürdürülebilirliği ciddi şekilde etkileyen en büyük küresel zorluklardan biridir (Zaman vd., 2018)

Toprak mikroorganizmaları, toprak organik maddesinin (TOM) ayrışmasında ve besin maddelerinin mineralizasyonunda önemli bir rol oynar ve böylece toprak verimliliğini ve kalitesini etkiler. Tuzluluk, toprak mikrobiyal aktivitesini ve topluluğunu düzenleyen temel belirleyicilerden biridir ve bazı çalışmalar tuzluluğun, mikroorganizmaların dünya genelindeki dağılım modellerini belirleyen en önemli faktör olduğunu bildirmiştir (Yang vd., 2020). Farklı çalışmalar, tuzluluk stresinin mikrobiyal topluluk yapısını, özellikle bakteri ve mantar topluluklarını değiştirebileceğini bildirmiştir (Yan vd., 2015; Rath vd., 2019; Yang vd., 2018). Bu değişim, ozmotik stresin (mikrobiyal hücrelerin ozmotik kuruması) ve spesifik iyonların etkisinin (Yuan ve diğerleri, 2007; Yan vd., 2015) inhibe edici etkilerinden kaynaklanan seçici baskıdan kaynaklanmaktadır. Artan tuzluluk, toprak çözeltisinin düşük ozmotik potansiyellerine yol açarak toprak organizmalarının su bulunabilirliğini kısıtlar (Rath vd., 2019) ve bu da mikrobiyal hücrelerin kurumasına ve lizisine neden olur (Yuan vd., 2007). Öte yandan, yüksek iyon konsantrasyonları (Na^+ , Cl^- ,

HCO_3^-) toprak mikroplarının toksisitesine neden olabilir (Yan vd., 2015). Birkaç çalışma, mantarların tuzlu topraklardaki bakterilere kıyasla tuzluluk stresine daha fazla dayanma kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir (Rath vd., 2019), muhtemelen mantarların kitinli hücre duvarlarının düşük matris potansiyellerine karşı koruma sağlaması gerçeğinden kaynaklanmaktadır (Manzoni vd., 2012). Bu, mantar hücre morfolojisindeki bir değişikliğin veya mantarların temel bir bileşeni olan ergosterol birikiminin bulgularında iyi bir şekilde gösterilmiştir (Wichern vd., 2006). Aksine, diğer çalışmalarda mantarların bakterilerden daha fazla tuz stresine duyarlı olabileceği bildirilmiştir (Sardinha vd., 2003; Chowdhury vd., 2011) ve tuzlu su ilavesiyle ergosterol (mantar hücre zarında bulunan steroid bileşeni) içeriğinde önemli bir azalma bildirilmiştir (Sardinha vd., 2003). Bu tür zıt bulgular, toprak koşullarındaki, biyomlardaki ve tuzluluk aralıklarındaki farklılıklara bağlanabilir, ancak mantarların ve bakterilerin tuzluluğuna duyarlılığını açıkça anlamak için bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Rath vd., 2019).

Tuzluluk stresine yanıt olarak toprak mikrobiyal topluluğundaki değişimlerin C döngüsü için etkileri olabileceği unutulmamalıdır. Örneğin, mantarlar daha karmaşık TOM'u parçalayabilir (Romani vd., 2006; Paterson vd., 2008), mantar nekromaslarının (ölü organizma kalıntılarının) toprakta bakteriyel kalıntılardan daha uzun bir dönüşüm süresi olabilir (Strickland ve Rousk, 2010). Ek olarak, Morrissey vd. (2014), bataklıklarda tuzluluğun C-parçalayıcı enzimler (karbon içeren organik bileşikler parçalayan enzimler) üzerinde önemli bir pozitif etkisi olduğunu bulmuş ve bakteri bolluğundaki ve topluluk yapısındaki değişikliklerin artan C-parçalayıcı enzimlerle ilişkili olduğunu öne sürmüştür (Haj-Amor vd., 2022).

6. SU TUTMA KAPASİTESİNİ ARTTIRMA

Mikroorganizmalar sadece toprak nem seviyelerine pasif olarak tepki vermekle kalmaz (Schimel, 2018), aynı zamanda suyun toprağa sızması, su tutulması ve buharlaşma gibi toprak suyuyla ilgili özellikleri aktif olarak değiştirebilir (Philippot vd., 2024). Mikroorganizmaların toprak hidrolojisini değiştirebileceği en az üç genel olarak tanımlanmış mekanizma vardır. Birincisi, bakteriler ve mantarlar doğrudan toprak su dinamiklerini değiştiren bileşikler salgılayabilir. Bu bileşikler arasında toprak ve kumların su tutma özelliğini artıran (Colica vd., 2014), makro gözenekleri tıkayarak hidrolik

iletkenliği azaltan (Benard vd., 2019), topraktan buharlaşma hızını yavaşlatan (Zheng vd., 2018; Adessi vd., 2018), hidrofobisitenin gelişmesi nedeniyle yeniden ıslatma oranlarını azaltan (Kroener vd., 2014) ve kolayca doymamış daha küçük gözenek boyutları nedeniyle kuru koşullarda sıvı fazın sürekliliğini koruyarak besin maddelerinin ve metabolik ürünlerin difüzyonunun gerçekleşmesini sağlayan (Morales vd., 2010) hücre dışı polimerik maddeler (EPS) bulunur. Bu mikrohidrolojik nişlerin mekanik ve hidrolojik özelliklerinin, EPS hidrojenleri ile toprak parçacıkları arasındaki etkileşimlerin ortaya çıkan özellikleri olduğu gösterilmiştir (Buchmann vd., 2020). Benzer şekilde, mantarlar toprak parçacık yüzeylerini kaplayan ve toprak su iticiliğinin büyüklüğünü ve yönünü değiştiren bileşikler üretebilir (Rillig, 2005). Bu tür bileşikler, koşullara bağlı olarak hidrofobik veya hidrofilik olabilen çok çeşitli amfifilik bileşikler (örneğin hidrofobinler) içerir.

İkinci olarak, mikroorganizmalar toprak parçacıklarını, gözenek organizasyonunu ve toprak yapısının kohezyonunu değiştirebilir ve böylece toprak su tutulmasını ve sızma oranlarını etkileyebilir (Rabot vd., 2018). Geçtiğimiz 15 yıl içinde, X-ışını mikrobilgisayarlı tomografinin hızlı gelişimi, bozulmamış ve nemli toprak örneklerinin gözenek sisteminin benzeri görülmemiş 3B görüntülerinin yanı sıra toprak gözeneklerinin boyutu, şekli, hacmi ve bağlantısı hakkında nicel bilgi elde etmeyi mümkün kılmıştır. Mikrobiyal büyümeyi teşvik etmek için organik bileşiklerle inkübe edilen toprakların gözenek sisteminin steril bir referans toprakla karşılaştırılması, mikrobiyal aktivitenin genellikle kılcal kuvvetler yoluyla kullanılabilir suyu tutabilen gözenekler olan toprak mikro gözeneklerinin hacmini artırdığını ve böylece su tutulmasını artırdığını göstermiştir (De Gryze vd., 2006; Zhang vd., 2021).

Üçüncüsü, mikroorganizmaların suyun toprakta hareketini kolaylaştırabileceğine dair bazı kanıtlar vardır. Bu olgu, belirli koşullar altında kök su alımını etkili bir şekilde artırabilen, hifleri boyunca bitkiler arasında suyun hareketini pasif olarak kolaylaştırabilen ve toprak profili boyunca suyun dağıtımını değiştirebilen mikorizal mantarlar için en iyi şekilde incelenir (Egerton-Warburton vd., 2007; Allen, 2007). Mikorizal mantarların toprak su bulunabilirliği üzerindeki bu etkileri, kuraklığın bitki verimliliği üzerindeki etkilerini hafifletmeye yetecek kadar büyük olabilir (Bahadur vd., 2019; Jia vd., 2021). Mikorizal katkıların su hareketine olan büyüklüğü yüksek olabilir; yakın

tarihli bir çalışma (Kakouridis vd., 2022), mikorizal hifler boyunca taşınan suyun, konuk bitkiler tarafından terlenen suyun yaklaşık %35'ini oluşturduğunu göstermiştir. Toprakta, filamentli bakteriler ve saprofitik mantarlar da dahil olmak üzere, suyu toprakta yeniden dağıtabilen başka mikroorganizmalar da olmasına rağmen, mikorizal olmayan mikroorganizmaların topraktaki su taşınımına olan katkıları iyi incelenmemiştir.

Mikroorganizmaların su bulunabilirliğini değiştirebildiği bu üç mekanizma mutlaka bağımsız değildir. Toprakta bulunan mikrobiyal taksonların geniş çeşitliliği göz önüne alındığında, hatta bireysel kümeler içinde bile, bu süreçler aynı anda meydana gelebilir veya belirli bir toprak profili içinde farklı konumlarda tabakalaşabilir (Bach vd., 2018). Benzer şekilde, mikroorganizmaların toprak hidrolojisi üzerindeki herhangi bir etkisi zaman içinde statik değildir. Toprak hidrolojisine mikrobiyal katkıların bu karmaşıklığı ve toprak hidrolojisindeki buna karşılık gelen karmaşıklık (mikrobiyal aktivitenin yokluğunda bile), mikroorganizmaların belirli bir topraktaki mevcut suyu ne ölçüde değiştirebileceğini önceden tahmin etmeyi zorlaştırır (Philippot vd., 2024).

7. TOPRAK SAĞLIĞI VE MİKROBİYAL BİYOLOJİK ÇEŞİTLİLİK

Toprak sağlığı, toprağın verimli, canlı ve sürdürülebilir bir şekilde ekosistem işlevlerini yerine getirebilme kapasitesiyle tanımlanmaktadır. Bu kapsamda sağlıklı bir toprak; bitki gelişimini destekleyen besin döngüsü, yeterli su tutma ve filtrasyon kapasitesi, yapısal stabilite ve biyolojik denge gibi temel işlevleri sürdürebilmelidir. Bu işlevlerin yürütülmesinde mikrobiyal biyolojik çeşitlilik merkezi bir rol oynamaktadır. Bakteriler, mantarlar, aktinomisetler, arkealar ve siyanobakteriler başta olmak üzere çok çeşitli mikroorganizmalar, toprak mikrobiyotasının temel bileşenlerini oluşturur ve toprak fonksiyonlarının çoğunun temelinde yer alır (Kiprotich vd., 2025; Philippot vd., 2013).

Toprak mikroorganizmaları, toprak verimliliğinin düzenlenmesi, organik maddenin ayrıştırılması, karbon tutulumu ve besin elementlerinin döngüsü gibi yaşamsal süreçleri yöneterek, gıda güvenliği ve iklim düzenlemesi gibi önemli ekosistem hizmetlerine doğrudan katkı sağlar (Lori vd., 2017; Philippot vd., 2013; Wagg vd., 2014). Mikrobiyal çeşitlilikte meydana gelen azalmalar,

toprağın çok işlevli yapısını olumsuz etkileyerek iklim düzenleme, verimlilik ve sürdürülebilir gıda üretimi gibi süreçlerde ciddi aksaklıklara neden olabilmektedir (García vd., 2018). Bu nedenle, mikrobiyal çeşitliliğin korunması; toprak sağlığı, ekosistem hizmetlerinin devamlılığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir.

Mikroorganizmalar, organik maddelerin ayrıştırılması, humus oluşumu, azot (N), fosfor (P) ve kükürt (S) gibi makro besin elementlerinin mineralizasyonu ve bitkilere biyoyararlanabilir formlarda sunulması, toprak agregasyonunun sağlanması, kirleticilerin biyolojik ayrışımı ve bitki patojenlerinin baskılanması gibi çok sayıda işlevi yerine getirir (Değirmenci vd., 2024; Kiprotich vd., 2025; Philippot vd., 2013). Bunun yanı sıra bazı toprak bakterileri, bitki gelişimini destekleyen fitohormonları sentezleyerek kök sisteminin gelişimini teşvik ederken mikorizal mantarlar ise bitkilerle kurdukları simbiyotik ilişkiler aracılığıyla su ve fosfor alımını artırarak bitki performansını iyileştirirler (Philippot vd., 2013). Ayrıca, antagonistik mikroorganizmalar, patojen fungus ve nematodlara karşı doğal antibiyotikler sentezleyerek biyolojik mücadelede etkili olmaktadır.

Toprakta zengin bir mikrobiyal çeşitliliğin bulunması, sadece toprak fonksiyonlarının sürekliliğini sağlamakta rol almaz, aynı zamanda bitkilerin kuraklık, tuzluluk ve aşırı sıcaklıklar gibi çeşitli çevresel stresleri tolere etmesine de yardımcı olur. Mikroorganizmalar, bitkilerin stres koşullarına uyum sağlama kapasitelerini artırmak için çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal yollarla etkileşim kurarlar. Özellikle rizosfer bölgesinde yer alan faydalı mikroorganizmalar, bitki kök sistemini etkileyerek su ve besin alımını optimize eden çeşitli yolları tetikleyebilir. Bu süreçte mikroorganizmalar; abiyotik stresle ilişkili fitohormonlar (örneğin absisik asit, jasmonatlar), enzimler (örneğin süperoksit dismutaz, peroksidaz) ve kök eksüdatları üretmek suretiyle bitkilerin osmotik dengeyi sağlamalarına, iyon toksisitesini azaltmalarına ve kök gelişimini desteklemelerine katkı sağlarlar (Dastogeer vd., 2022; Kiprotich vd., 2025; Ma vd., 2020). Aynı bu zengin mikrobiyal çeşitlilik türler arası işlevsel farklılıklar veya belirli bir mikrobiyal fonksiyonun bozulması durumunda, alternatif türlerin devreye girerek bu boşluğu doldurmasına da olanak tanır. Yapılan bilimsel çalışmalar, mikrobiyal çeşitliliğin yüksek olduğu topraklarda fonksiyonel stabilitenin daha uzun süre korunabildiğini ve bunun

da ekosistem üretkenliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir (Wagg vd., 2014).

Bu bağlamda, sürdürülebilir toprak yönetim uygulamaları, mikrobiyal biyolojik çeşitliliğin teşvik edilmesi ve toprak sağlığının korunması açısından önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir. Organik tarım, ürün rotasyonu, örtü bitkisi kullanımı, kompost veya yeşil gübre uygulanması, mikorizal mantar ya da azot fikse eden bakterilerin aşılınması ve azaltılmış toprak işleme (minimum sürüm veya doğrudan ekim) gibi yaklaşımlar, toprak yapısını ve mikrobiyal habitatları koruyarak faydalı mikroorganizmaların popülasyonlarını destekler (Değirmenci vd., 2024; Kiprotich vd., 2025; Lori vd., 2017).

Sonuç olarak, mikrobiyal biyolojik çeşitlilik, toprak fonksiyonlarının sürdürülmesinde ve ekosistem hizmetlerinin devamlılığında temel belirleyici unsurlardan biridir. Ayrıca toprakta zengin mikrobiyal topluluğun varlığı, toprak yapısal stabilitesinin artmasına, kimyasal gübre bağımlılığının azalmasına ve bitkisel üretimde biyolojik dayanıklılığın yükselmesine katkı sağlamaktadır.

8. TARIM UYGULAMALARI VE MİKROBİYAL TOPLULUKLARIN ETKİLEŞİMİ

Tarım uygulamaları, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini değiştirerek topraktaki mikrobiyal topluluklar üzerinde belirgin etkilere neden olmaktadır. Bu etkiler, mikrobiyal topluluğun yapısını (tür çeşitliliği ve kompozisyonu), bolluğunu ve aktivitesini doğrudan etkilemektedir. Mikrobiyal topluluğu etkileyen önemli tarım uygulamaları toprağın işlenmesi, gübreleme, pestisit kullanımı, ekin rotasyonu, ve sürekli ekin uygulamaları olarak sıralanabilir. Ayrıca bitki kompozisyonunun gerek iklimsel gerekse toprak ve beslenme faktörleri nedeniyle değişimi de önemlidir (Acar ve ark. 2019, Darcan ve ark. 2021). Bu değişim hem bitkiler hem de mikroorganizma faaliyetlerini etkilemektedir.

Toprağın işlenmesi, tarımsal üretimde yaygın olarak kullanılan temel bir uygulamadır. Bu işlemle birlikte toprak agregatları parçalanır, toprak karışır ve havalanır. Dolayısıyla toprağın nem içeriği, sıcaklığı ve organik madde dağılımı da bu durumdan etkilenir. Bu fiziksel değişiklikler topraktaki mikrobiyal toplulukların dağılımını doğrudan etkilemektedir. Azaltılmış toprak işleme veya sıfır toprak işleme gibi yöntemler toprak yapısını daha fazla korurken

yüzeyde bitki kalıntılarının birikmesine ve agregat stabilitesinin artmasına olanak tanımaktadır. Yapılan araştırmalar bu yöntemlerin toprak yüzeyindeki mikrobiyal biyokütleyi ve toplam mikrobiyal bolluğu artırdığını göstermektedir. Bu yöntemlerden farklı olarak geleneksel toprak işleme tekniğinde ise yüzeydeki organik maddeler daha derin katmanlara taşınır ve bu bölgedeki mikrobiyal aktivite de artışa neden olur (Sun vd., 2018).

Gübreleme bitki büyümesi için gerekli besin maddelerinin toprağa eklenmesini amaçlayan bir tarım uygulamasıdır. Gübreler genellikle kimyasal veya organik kaynaklıdır. Organik gübreler, mikroorganizmalar için hem besin hem de karbon kaynağı sağlamaktadır. Dolayısıyla organik gübreler özellikle heterotrofik mikroorganizmalar için enerji ve yapı taşı sağlar, daha çeşitli nişler yaratır ve toprak yapısını iyileştirir. Kimyasal gübrelemenin ise mikrobiyal topluluklar üzerinde pozitif bir etkiye sahip olmadığı hatta fazla kullanımında yüksek tuzluluk ve pH değişimi gibi streslerle olumsuz etkilere neden olduğu söylenebilir (Dinc  vd., 2022).

Pestisitler, tarımsal üretim sırasında zararlı böceklerden, yabancı otlardan ve diğer patojenlerden korunmak amacıyla kullanılan kimyasal ve biyolojik maddelerdir. Her ne kadar üretimi korumak için bir araç olarak kullanılıyor olsalar da toprak ekosistemi üzerinde oldukça zararlı etkilere sahiptir. Bu maddeler, sadece hedef organizmalara değil aynı zamanda hedefi olmayan yararlı organizmalara da zarar vermektedir. Pestisitler mikroorganizmalar için çevresel stres faktörü oluşturur ve faydalı mikroorganizmalar üzerinde bakterisidal veya bakteriyostatik etki gösterebilirler (Ni vd., 2025). Bunun yanı sıra mikroorganizmalar karşılaştıkları streslere karşı hızlı bir şekilde adapte olabilmektedir (Türkyılmaz & Darcan, 2024). Bu adaptasyon mekanizmaları sayesinde pestisit varlığında hem bu pestisitlere hem de buna bağlı olarak farklı stres faktörlerine (antibiyotik ve dezenfektan gibi) dirençli varyantlar ortaya çıkabilir. Direnç sağlayan bu yeni genler, yatay gen transferi aracılığıyla organizmalar arasında hızlıca yayılabilir ve mevcut tedavi yöntemlerinin zayıflamasına neden olabilirler (Türkyılmaz & Darcan, 2023).

Ekin rotasyonu aynı tarım arazisinde farklı bitki türlerinin belirli bir sıra ve periyotta yetiştirilmesi iken sürekli ekin uygulaması aynı tarım arazisinde aynı bitki türünün art arda yıllarca yetiştirilmesidir. Bu iki yöntemin toprak ve mikroorganizmalar üzerindeki etkileri birbirinin tam tersi olacak şekilde

düşünülebilir. Bitkiler kökleri aracılığıyla toprağa organik bileşikler salgılar. Ekin rotasyonu ile birlikte topraktaki organik bileşik çeşitliliği artar ve daha dinamik bir ortamın oluşması sağlanır. Dolayısıyla topraktaki mikrobiyal çeşitlilik ve biyokütle artış gösterir (Zong vd., 2024). Sürekli ekin uygulaması ise topraktaki belirli organik maddelerin sayısında sürekli bir artışa belirli maddelerde ise sürekli bir azalmaya yol açar. Bu da zamanla besin dengesizliğinin oluşmasına neden olur. Bu çevresel değişiklikler mikroorganizmalar açısından seçici bir baskı oluşturur. Yapılan çalışmalar sürekli ekim uygulaması ile birlikte faydalı mikroorganizmaların sayısında bir azalma, patojen sayısında ise bir artış olduğunu göstermiştir (Chen et al., 2022). Dolayısıyla bu uygulama verim kaybına ve hastalık salgınlarına yol açabilir.

Tarım uygulamaları, toprağın sadece fiziksel ve kimyasal özelliklerini değil, aynı zamanda mikrobiyal toplulukların yapısını ve işlevini de önemli ölçüde şekillendirmektedir. Toprak işleme, gübreleme, pestisit kullanımı ve ekim sistemleri gibi uygulamalar mikroorganizmaların çeşitliliğini, bolluğunu ve metabolik aktivitelerini artırıcı ya da baskılayıcı yönde etkileyebilir. Özellikle sürdürülebilir ve ekolojik temelli yaklaşımlar (örneğin azaltılmış toprak işleme, organik gübreleme ve ekin rotasyonu), toprak mikrobiyal sağlığını destekleyerek uzun vadede hem toprak kalitesini hem de tarımsal verimliliği artırabilir. Bu nedenle tarımsal uygulamaların planlanmasında, mikrobiyal ekosistemlerin korunması ve desteklenmesi temel bir öncelik olmalıdır.

KAYNAKÇA

- Acar, Z., Leblebici, S., Gülümser, E., Can, M., & Ayan İ. (2019) The effect of leaf extracts in different growth periods of *Bituminaria bituminosa* (L.) CH Stirt. on some germination and seedling development parameters of wheat. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22, 10-15
- Adessi, A., Cruz de Carvalho, R., De Philippis, R., Branquinho, C. & Marques da Silva, J. Microbial extracellular polymeric substances improve water retention in dryland biological soil crusts. *Soil Biol. Biochem.* 116, 67–69 (2018).
- Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., Araneda, N., Valdebenito, E., Hansen, F., & Nuti, M. (2023). Microbial community in the composting process and its positive impact on the soil biota in sustainable agriculture. *Agronomy*, 13(2), 542.
- Ahmed, E., & Holmström, S. J. M. (2015). Microbe–mineral interactions: the impact of surface attachment on mineral weathering and element selectivity by microorganisms. *Chemical Geology*, 403, 13–23.
- Allen, M. F. Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone J.* 6, 291–297 (2007).
- Andlar, M., Rezić, T., Marđetko, N., Kracher, D., Ludwig, R., & Šantek, B. (2018). Lignocellulose degradation: an overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation. *Engineering in Life Sciences*, 18(11), 768.
- Ayilara, M. S., & Babalola, O. O. (2023). Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1183691.
- Bach, E. M., Williams, R. J., Hargreaves, S. K., Yang, F. & Hofmockel, K. S. Greatest soil microbial diversity found in micro-habitats. *Soil Biol. Biochem.* 118, 217–226 (2018).
- Bahadur, A. et al. Mechanistic insights into arbuscular mycorrhizal fungi-mediated drought stress tolerance in plants. *Int. J. Mol. Sci.* 20, 4199 (2019).
- Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment. *Toxics*, 10(8), 484.
- Benard, P. et al. Microhydrological niches in soils: how mucilage and EPS alter the biophysical properties of the rhizosphere and other biological hotspots. *Vadose Zone J.* 18, 180211 (2019).

- Bhattacharai, A., Bhattacharai, B., & Pandey, S. (2015). Variation of soil microbial population in different soil horizons. *Journal of Microbiology & Experimentation*, 2(2), 1-4.
- Bolan, N. S. & Hedley, M. J. Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. in *Handbook of Soil Acidity* (CRC Press, 2003).
- Buchmann, C., Steinmetz, Z., Brax, M., Peth, S. & Schaumann, G. E. Effect of matric potential and soil–water–hydrogel interactions on biohydrogel-induced soil microstructural stability. *Geoderma* 362, 114142 (2020).
- Chen, F., Li, X., Zhu, Q., Ma, J., Hou, H., & Zhang, S. (2019). Bioremediation of petroleum-contaminated soil enhanced by aged refuse. *Chemosphere*, 222, 98-105.
- Chen, Q., Song, Y., An, Y., Lu, Y., & Zhong, G. (2024). Soil microorganisms: their role in enhancing crop nutrition and health. *Diversity*, 16(12), 734.
- Chen, Y., Du, J., Li, Y., Tang, H., Yin, Z., Yang, L., & Ding, X. (2022). Evolutions and managements of soil microbial community structure drove by continuous cropping. *Frontiers in Microbiology*, 13, 839494.
- Chowdhury vd., 2011 Chowdhury, N., Nakatani, A. S., Setia, R., & Marschner, P. (2011). Microbial activity and community composition in saline and non-saline soils exposed to multiple drying and rewetting events. *Plant and soil*, 348, 103-113.
- Colica, G. et al. (2014). Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils. *Soil Biol. Biochem.* 68, 62–70.
- Crowley, D. E., & Alvey, S. A. (2002). Regulation of microbial processes by soil pH. In *Handbook of Plant Growth pH as the Master Variable* (pp. 343-370). CRC Press.)
- Darcan C. (2012). Expression of OmpC and OmpF porin proteins and survival of *Escherichia coli* under photooxidative stress in Black Sea water. *Aquatic Biology* 17 (2), 97-105
- Darcan, C., Kaygusuz, Ö., Leblebici, S., Gülümser, E., Acar, Z. (2021). Antimicrobial activity of leaf extracts of *Bituminaria* sp. genotypes at different growth stages. *Indian Journal of Experimental Biology* 59 (5), 302-309
- Dastogeer, K. M., Zahan, M. I., Rhaman, M. S., Sarker, M. S., & Chakraborty, A. (2022). Microbe-mediated thermotolerance in plants and pertinent mechanisms-a meta-analysis and review. *Frontiers in Microbiology*, 13, 833566.
- De Gryze, S. et al. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses. *Geoderma* 134, 82–96 (2006).

- Deshmukh, R., Khardenavis, A. A., & Purohit, H. J. (2016). Diverse metabolic capacities of fungi for bioremediation. *Indian Journal of Microbiology*, 56(3), 247-264.
- Dincă, L. C., Grenni, P., Onet, C., & Onet, A. (2022). Fertilization and soil microbial community: a review. *Applied Sciences*, 12(3), 1198.
- Egerton-Warburton, L. M., Querejeta, J. I. & Allen, M. F. Common mycorrhizal networks provide a potential pathway for the transfer of hydraulically lifted water between plants. *J. Exp. Bot.* 58, 1473–1483 (2007).
- El Fels, L., Naylo, A., Jemo, M., Zrikam, N., Boularbah, A., Ouhdouch, Y., & Hafidi, M. (2024). Microbial enzymatic indices for predicting composting quality of recalcitrant lignocellulosic substrates. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1423728.
- Erdem, E. I., İnce, O., Akyol, Ç., Özbayram, E. G., & İnce, B. (2015). Bahçe atıkları kompostunun yasal düzenlemeler çerçevesinde toprak şartlandırıcısı olarak kullanımının incelenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 65-80.
- Fernandes, T. R., Segorbe, D., Prusky, D. & Di Pietro, A. How alkalization drives fungal pathogenicity. *PLoS Pathog.* 13, e1006621 (2017).
- Fierer, N. Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nat. Rev. Microbiol.*, 15, 579–590 (2017).
- Finlay, R. D., Mahmood, S., Rosenstock, N., Bolou-Bi, E. B., Köhler, S. J., Fahad, Z., Rosling, A., Wallander, H., Belyazid, S., Bishop, K., & Lian, B. (2020). Reviews and syntheses: biological weathering and its consequences at different spatial levels - From nanoscale to global scale. *Biogeosciences*, 17(6), 1507–1533.
- Gadd, G. M. et al. Oxalate production by fungi: significance in geomycology, biodeterioration and bioremediation. *Fungal Biol. Rev.* 28, 36–55 (2014).
- García, F. C., Bestion, E., Warfield, R., & Yvon-Durochera, G. (2018). Changes in temperature alter the relationship between biodiversity and ecosystem functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(43), 10989–10994.
- Gondal, A. H., Hussain, I., Ijaz, A. B., Zafar, A., Ch, B. I., Zafar, H., ... & Usama, M. (2021). Influence of soil pH and microbes on mineral solubility and plant nutrition: A review. *International Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 5(1), 71-81.
- Haj-Amor Z, Araya T, Kim DG, Bouri S, Lee J, Ghiloufi W, Yang Y, Kang H, Jhariya MK, Banerjee A, Lal R. (2022). Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review. *Sci Total Environ.*, 2022 Oct 15;843:156946. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156946. Epub 2022 Jun 26. PMID: 35768029).

- Hervé, V., Junier, T., Bindschedler, S., Verrecchia, E. & Junier, P. (2016). Diversity and ecology of oxalotrophic bacteria. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 32, 28.
- Horner-Devine, M. C., Carney, K. M., & Bohannon, B. J. (2004). An ecological perspective on bacterial biodiversity. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 271(1535), 113-122.
- Howarth, R. W., Stewart, J. W. B. & Ivanov, M. V. Sulphur Cycling on the Continents: Wetlands, Terrestrial Ecosystems and Associated Water Bodies (John Wiley & Sons, Ltd, 1992).
- Huet, S. et al. (2023). Experimental community coalescence sheds light on microbial interactions in soil and restores impaired functions. *Microbiome*, 11, 42.
- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant Soil*, 362, 389–417.
- Jackson, T. A. (2015). Weathering, secondary mineral genesis, and soil formation caused by lichens and mosses growing on granitic gneiss in a boreal forest environment. *Geoderma*, 251, 78–91.
- Jia, Y., van der Heijden, M. G. A., Wagg, C., Feng, G. & Walder, F. (2021). Symbiotic soil fungi enhance resistance and resilience of an experimental grassland to drought and nitrogen deposition. *J. Ecol.* 109, 3171–3181.
- Jones, D. L., Dennis, P. G., Owen, A. G. & van Hees, P. A. W. (2003). Organic acid behavior in soils— misconceptions and knowledge gaps. *Plant Soil*, 248, 31–41.
- Joshi, N., Gothwal, R., Singh, M., & Dave, K. (2021). Novel sulphur-oxidizing bacteria consummate sulphur deficiency in oil seed crop. *Archives of Microbiology*, 203(1), 1-6.
- Kakde, P., & Sharma, J. (2024). Microbial bioremediation of petroleum contaminated soil: structural complexity, degradation dynamics and advanced remediation techniques. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 18(4), 2244-2261.
- Kakouridis, A. et al. Routes to roots: direct evidence of water transport by arbuscular mycorrhizal fungi to host plants. *N. Phytol.* 236, 210–221 (2022).
- Kaviya, N., Upadhyay, V. K., Singh, J., Khan, A., Panwar, M., & Singh, A. V. (2019). Role of microorganisms in soil genesis and functions. *Mycorrhizosphere and Pedogenesis*, 25–52.
- Kiprotich, K., Muema, E., Clabe Wekesa, ·, Ndombi, · Tavasi, Muoma, · John, Dennis Omayio, ·, Dennis Ochieno, ·, Motsi, H., Mncedi, S., & Tarus, J. (2025). Unveiling the roles, mechanisms and prospects of soil microbial communities in sustainable agriculture. *Discover Soil*, 2(1), 1–24.

- Koch, T. & Dahl, C. (2018). A novel bacterial sulfur oxidation pathway provides a new link between the cycles of organic and inorganic sulfur compounds. *ISME J.*, 12, 2479–2491.
- Kour, D., Khan, S. S., Kour, H., Kaur, T., Devi, R., Rai, P. K., Judy, C., McQuestion, C., Bianchi, A., Spells, S., Mohan, R., Rai, A. K., & Yadav, A. N. (2022). Microbe-mediated bioremediation: Current research and future challenges. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 10(2), 6–24.
- Kroener, E., Zarebanadkouki, M., Kaestner, A. & Carminati, A. (2014). Nonequilibrium water dynamics in the rhizosphere: how mucilage affects water flow in soils. *Water Resour. Res.* 50, 6479–6495.
- Linder, T. (2018). Assimilation of alternative sulfur sources in fungi. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 34, 51.
- Lori, M., Symnaczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gattinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity A meta-analysis and meta-regression. *PLOS ONE*, 12(7), e0180442.
- Ma, Y., Dias, M. C., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11(13), 591911.
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G. I. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196(1), 79–91.
- Mawang, C. I., Azman, A. S., Fuad, A. S. M., & Ahamad, M. (2021). Actinobacteria: An eco-friendly and promising technology for the bioaugmentation of contaminants. *Biotechnology Reports*, 32, e00679.
- Mergelov, N. et al. (2018). Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth. *Sci. Rep.*, 8, 3367.
- Morales, V. L., Parlange, J.-Y. & Steenhuis, T. S. (2010). Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. *J. Hydrol.* 393, 29–36.
- Morrissey, E. M., Mau, R. L., Schwartz, E., McHugh, T. A., Dijkstra, P., Koch, B. J., ... & Hungate, B. A. (2017). Bacterial carbon use plasticity, phylogenetic diversity and the priming of soil organic matter. *The ISME journal*, 11(8), 1890–1899.
- Napieralski, S. A. et al. (2019). Microbial chemolithotrophy mediates oxidative weathering of granitic bedrock. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 116, 26394–26401.
- Nemet, F., Perić, K., & Lončarić, Z. (2021). Microbiological activities in the composting process – A review. *COLUMELLA – Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 8(2), 41–53.
- Ni, B., Xiao, L., Lin, D., Zhang, T. L., Zhang, Q., Liu, Y., Chen, Q., Zhu, D., Qian, H., Rillig, M. C., & Zhu, Y. G. (2025). Increasing pesticide

- diversity impairs soil microbial functions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(2), e2419917122.
- Ni, G., Leung, P. M., Daebeler, A., Guo, J., Hu, S., Cook, P., ... & Greening, C. (2023). Nitrification in acidic and alkaline environments. *Essays in biochemistry*, 67(4), 753-768.
- Nivethadevi, P., Swaminathan, C., & Kannan, P. (2021). Chapter-4 soil organic matter decomposition-roles, factors and mechanisms. *Sukul SP, ed.: Latest Trends in Soil Sciences volume 1, Publisher: Integrated Publications, New Delhi*, 133, 61.
- Norton, J. & Ouyang, Y. (2019). Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. *Front. Microbiol.*, 10, 1931.
- Obahiagbon, K. O., Amenaghawon, A. N., Agbonghae, E., Obahiagbon, K. O., Amenaghawon, A. N., & Agbonghae, E. O. (2014). Effect of initial pH on the bioremediation of crude oil polluted water using a consortium of microbes. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 15(1), 452-457.
- Ödemiş, M., Küçük, Ç. (2021). Aktinomisetlerin bitki gelişimindeki önemi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 14(1), 91–100.
- Palmieri, D., Vitale, S., Lima, G., Di Pietro, A. & Turrà, D. (2020). A bacterial endophyte exploits chemotropism of a fungal pathogen for plant colonization. *Nat. Commun.*, 11, 5264.
- Paterson ve diğerleri, 2008 Paterson, E., Osler, G., Dawson, L. A., Gebbing, T., Sim, A., & Ord, B. (2008). Labile and recalcitrant plant fractions are utilised by distinct microbial communities in soil: independent of the presence of roots and mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(5), 1103-1113.
- Philippot L, Chenu C, Kappler A, Rillig MC, Fierer N. (2024). The interplay between microbial communities and soil properties. *Nat Rev Microbiol.*, 22(4), 226-239.
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & Van Der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), 789-799.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 314, 122–137.
- Rath, K. M., Murphy, D. N., & Rousk, J. (2019). The microbial community size, structure, and process rates along natural gradients of soil salinity. *Soil Biology and Biochemistry*, 138, 107607.
- Ribeiro, I. D. A., Volpiano, C. G., Vargas, L. K., Granada, C. E., Lisboa, B. B., & Passaglia, L. M. P. (2020). Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 590774.

- Rillig, M. C. (2005). A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency? *Pedobiologia* 49, 395–399.
- Romaní, A. M., Vázquez, E., & Butturini, A. (2006). Microbial availability and size fractionation of dissolved organic carbon after drought in an intermittent stream: biogeochemical link across the stream–riparian interface. *Microbial ecology*, 52, 501–512.
- Sánchez-Cañete, E. P., Barron-Gafford, G. A. & Chorover, J. (2018). A considerable fraction of soil-respired CO₂ is not emitted directly to the atmosphere. *Sci. Rep.* 8, 13518.
- Sardinha, M., Müller, T., Schmeisky, H., & Joergensen, R. G. (2003). Microbial performance in soils along a salinity gradient under acidic conditions. *Applied Soil Ecology*, 23(3), 237–244.
- Schimel, J. P. (2018). Life in dry soils: effects of drought on soil microbial communities and processes. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 49, 409–432.
- Strickland, M. S., & Rousk, J. (2010). Considering fungal: bacterial dominance in soils—methods, controls, and ecosystem implications. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1385–1395.
- Sullivan, T. S., Barth, V. P., & Lewis, R. W. (2017). Soil acidity impacts beneficial soil microorganisms.
- Sun, R., Li, W., Dong, W., Tian, Y., Hu, C., & Liu, B. (2018). Tillage changes vertical distribution of soil bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*, 9, 347825.
- Syed, S., Buddolla, V. & Lian, B. (2020). Oxalate carbonate pathway — conversion and fixation of soil carbon — a potential scenario for sustainability. *Front. Plant Sci.*, 11, 591297.
- Trautmann, N., & Olynciw, E. (1996). CORNELL Composting - Compost Microorganisms. *Cornell Waste Management Institute*.
- Türkyılmaz, O., & Darcan, C. (2023). The emergence and preventability of globally spreading antibiotic resistance: a literature review. *Biology Bulletin Reviews*, 13(6), 578–589.
- Türkyılmaz, O., & Darcan, C. (2024). Resistance mechanism of *Escherichia coli* strains with different ampicillin resistance levels. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 108(1), 1–14.
- Vogel, H. J., Balseiro-Romero, M., Kravchenko, A., Otten, W., Pot, V., Schlüter, S., Weller, U., & Baveye, P. C. (2021). A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13152.
- Vylkova, S. (2017). Environmental pH modulation by pathogenic fungi as a strategy to conquer the host. *PLoS Pathog.* 13, e1006149.
- Wagg, C., Bender, S. F., Widmer, F., & Van Der Heijden, M. G. A. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem

- multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(14), 5266–5270.
- Wang, X., Chi, Y., & Song, S. (2024). Important soil microbiota's effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1347745.
- Wichern vd., 2006 Wichern, J., Wichern, F., & Joergensen, R. G. (2006). Impact of salinity on soil microbial communities and the decomposition of maize in acidic soils. *Geoderma*, 137(1-2), 100-108.
- Wild, B., Gerrits, R., & Bonneville, S. (2022). The contribution of living organisms to rock weathering in the critical zone. *npj Materials degradation*, 6(1), 98.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International soil and water conservation Research*, 3(4), 316-323.
- Yang ve diğerleri, 2018 Yang, Y., & Guo, Y. (2018). Unraveling salt stress signaling in plants. *Journal of integrative plant biology*, 60(9), 796-804.
- Yang, C., & Sun, J. (2020). Soil salinity drives the distribution patterns and ecological functions of fungi in saline-alkali land in the Yellow River Delta, China. *Frontiers in Microbiology*, 11, 594284.
- Yang, Z., Haneklaus, S., Ram Singh, B. & Schnug, E. (2007). Effect of repeated applications of elemental sulfur on microbial population, sulfate concentration, and pH in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39, 124–140.
- Yuan, J., Tian, C., & Feng, G. (2010). Effects of sodium on nitrate uptake and osmotic adjustment of Suaeda physophora. *Journal of Arid Land*, 2(3), 190-196.
- Zaharescu, D. G., Burghilea, C. I., Dontsova, K., Reinhard, C. T., Chorover, J., & Lybrand, R. (2020). Biological weathering in the terrestrial system. *Biogeochemical Cycles: Ecological Drivers and Environmental Impact*, 1–32.
- Zaman, M., Shahid, S. A., Heng, L., Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*, 43-53.
- Zhang, W., Gao, W., Whalley, W. R. & Ren, T. Physical properties of a sandy soil as affected by incubation with a synthetic root exudate: strength, thermal and hydraulic conductivity, and evaporation. *Eur. J. Soil Sci.* 72, 782–792 (2021).
- Zhao, Y., Zhao, Y., Zhang, Z., Wei, Y., Wang, H., Lu, Q., Li, Y., & Wei, Z. (2017). Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose

degradation and the formation of humic substances during composting. *Waste Management*, 68, 64–73.

Zheng, W., Zeng, S., Bais, H., LaManna, J. M., Hussey, D. S., Jacobson, D. L., & Jin, Y. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) reduce evaporation and increase soil water retention. *Water Resources Research*, 54(5), 3673-3687.

Zong, D., Zhou, Y., Zhou, J., Zhao, Y., Hu, X., & Wang, T. (2024). Soil microbial community composition by crop type under rotation diversification. *BMC Microbiology*, 24(1), 435.

BÖLÜM 5
TOPRAK ISLAHINDA FİTOREMEDİASYON
UYGULAMALARINA BAKIŞ

Prof. Dr. Edip AVŞAR¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16369990>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri, Çevre Koruma ve Kontrol, Bilecik, Türkiye. edip.avsar@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0001-6249-4753

1.1 Giriş

Nüfusun artışıyla beraber tarımsal üretim de her geçen gün artmaktadır. Bu durum ürün miktar ve kalitesini artırmak için daha fazla gübre, pestisit ve herbisit kullanılmasına neden olmaktadır. Tarım kimyasallarının kullanımı, bu kimyasalların toprak ve bitki bünyesinde birikmesi dolayısıyla çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Fosfatlı gübreler toprakta kadmiyum (Cd), bakır (Cu), çinko (Zn) ve arsenik (As) konsantrasyonunun artışına yol açmıştır. Tarım yanında evsel ve endüstriyel aktivitelerde toprak ve suyun kirlenmesine yol açmaktadır. Özellikle su kirliliği dolayısıyla Dünya çapında yılda yaklaşık 25 milyon insan ölmektedir. Su kalitesinin belirlenmesinde Çözülmüş oksijen (ÇO), nitrat (NO_3^-), klorür (Cl^-) ve sülfatların (SO_4^{2-}) varlığı, askıda katı maddeler (AKM), çevresel hormonlar, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), ağır metaller ve bakteri varlığı gibi parametreler göz önüne alınmaktadır (Moosavi & Seghatoleslami, 2013; Wang, Zhang, & Cai, 2011).

Toprak ve su ekosistemlerinin kalitesinin bozulmasından esas olarak inorganik ve organik kirleticiler sorumludur. Sanayi devrimiyle birlikte yerkürede canlılığın sürdüğü ekosfer (biyosfer) tabakasında ağır metal kirliliği önemli ölçüde artarak önemli bir çevre problemi haline gelmiştir. Ağır metallerle kirlenen toprak ve su kaynakları insan sağlığı için en önemli tehditlerden biridir. Ek olarak kentleşme, yoğun sanayi üretimi ve organik bileşiklerin özellikle boyalarda, patlayıcılarda, ilaç ve pestisit üretiminde yoğun kullanımı sonucunda günümüzde organik zenobiyotikler (pestisitler, farmosötikler, petrol bileşikleri, PAH'lar, PCB'ler) son 40 yılda dünya çapında küresel problem haline gelmiştir. Zenobiyotikler biyoparçalanmaya dayanklı olup toprak ekosistemlerinde uzun zaman kalabilmekte ve çok çeşitli çevresel problemlere neden olmaktadır. Bunlarla kirlenmiş ortamların temizlenmesi için fiziksel, kimyasal biyolojik ıslah yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemlerin artan maliyeti, verim sınırları, eleman ihtiyacı, doğal sistemi bozucu etkileri ve çevre dostu olmaması uygulanmalarının sınırlı kalmasına ve daha farklı yöntemlerin geliştirilmesine vesile olmuştur. Bu yeni yöntemlerden biri olan fitoremediasyon kirlenmiş su ve toprak kirliliğinin gideriminde uygulanan düşük maliyetli bir yöntemdir (Moosavi & Seghatoleslami, 2013; Singh & Jain, 2003; Pandey & Bajpai, 2018).

Fitoremediasyon, doğal ya da genetiği değiştirilmiş çok çeşitli yüksek organizmalar (yeşil vejetasyon, bitkiler, sucul bitkiler, ağaçlar, çimenler)

vasıtasıyla kirlenmiş ortamların (hava, su, toprak) toksik kirleticilerden temizlenmesidir. Yöntemde bitkilerin toprak üstü sürgünlerinde kirleticiler biriktirilir. Yunanca kökenli “Phyto” (bitki) ve Latince kökenli “remedium” (temizleme veya iyileştirme) kelimelerinden türetilmiştir. Dünya çapında atıksulardan kirleticilerde gideriminde fitoremediasyonun yaklaşık 300 yıllık bir geçmişi vardır. Ancak bitkilerin ağır metal ve diğer kirleticilerin gideriminde kullanılması kavramı ilk olarak 1983’de raporlanmıştır (Moosavi & Seghatoleslami, 2013; Singh & Jain, 2003; Pandey & Bajpai, 2018; Butcher, 2009).

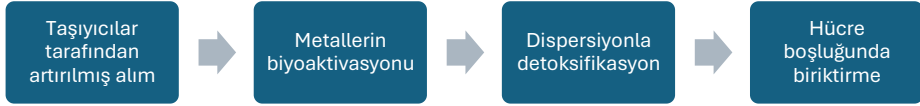
Son otuz yıldır, yüzey ve yeraltısuyundan ve sığ toprak tabakalarından kirleticilerin uzaklaştırılmasında fitoremediasyon giderek daha yaygın kullanılan bir ıslah yöntemi haline gelmiştir. Bunun yanında yerinde rehabilitasyon teknolojisi olarak sediment ve dış atmosferden kirleticilerin gideriminde de kullanılmaktadır. Bitkilerin havadaki organik bileşiklerini bağlama kabiliyetleri oldukça yüksek olup son yıllarda fitoremediasyonla ilgili araştırmalar bu konuya yoğunlaşmaktadır. Özellikle kirlilik seviyesi düşükle orta düzey civarı değişen sığ su kütlelerinin iyileştirilmesi için yararlı, estetik açıdan hoş, güneş enerjisiyle çalışan pasif bir tekniktir. Çevreye dost, maliyeti düşük, kolaylıkla biyolojik olarak parçalanamayan metal gibi kirleticilerin bitkiler vasıtasıyla tutulduğu ve bu bitkiler hasat edilerek bu kirleticilerin geri kazanılabildiği bu teknik çeşitli araştırmalara konu olmaktadır (Wang, Zhang, & Cai, 2011; Singh & Jain, 2003; Lee, 2013).

Fitoremediasyonun avantaj, dezavantaj ve sınırlılıkları Tablo 1’de verilmiştir.

Fitoremediasyonda kirlenmiş toprağın rehabilitasyonunda ilk adım, toprakta su ve havanın hareket edebileceği ve böylece toprak bünyesine nüfuz edeceği şekilde geçirgen oluşmasıdır. Bu işlem rehabilitasyon için kullanılan bitkilerin kök büyümesi ile fiziksel olarak sağlanır. Böylece sadece toprakta fiziki boşluklar oluşmaz, bunun yanında bitkinin kök sistemi (rizosfer) içinde ve çevresinde mikrobiyal topluluk gelişimiyle beraber toprak biyolojisi de değişmiş olur (Pandey & Bajpai, 2018).

Fitoremediasyon mekanizması Şekil 1’de verilmiştir. Bu mekanizmayla toksik metaller bitkiler tarafından zararsız formlara dönüştürülür. Organik ve inorganik kirleticiler farklı yollarla zararsız hale getirilirler. Fitoremediasyonun ilkesi esas olarak kirleticinin bitkide ekstraksiyonu (özütlenmesi), kirleticinin

bünyede uçucu hale getirilmesi, stabilizasyonu ve bozunması şeklinde tanımlanabilir (Jeevanantham, ve diğerleri, 2019; Su, Wang, Huang, Chen, & Wang, 2022).



Şekil 1: Fitoremediasyon mekanizması (Jeevanantham, ve diğerleri, 2019)

Ağır metaller; canlı bünyesindeki biyokimyasal ve fizyolojik süreçleri doğrudan etkilemek, büyümeyi azaltmak, hücre organellerini bozmak ve fotosentezi engellemek suretiyle makro ve mikroorganizmalar için zehirleyici etki gösterebilir. Ağır metallerle (kurşun, krom, arsenik, çinko, kadmiyum, bakır, cıva ve nikel) kirlenmiş toprakların doğrudan yutulması, kirlenmiş topraklarda yetiştirilen mahsul ve sebzelerin tüketilmesi veya bu tür topraklardan sızan içme suyu yoluyla insanlar ve ekosistem kimyasal tehlikelere maruz kalabilir. Neredeyse Dünya üzerindeki tüm ülkeler ağır metal kirliliğinden etkilenmektedir. Dünya üzerinde 10 milyondan fazla kirlenmiş zemin raporlanmış olup bunların %50'sinde ağır metal kirliliği görülmüştür. Amerika'da 600.000, Batı Avrupa'da ise 1,4 milyon alanda ağır metal kirliliği raporlanmıştır (Moosavi & Seghatoleslami, 2013; Su, Wang, Huang, Chen, & Wang, 2022).

Canlı metabolizmada ağır metaller işlevsel rollerine göre gerekli ve gerekli olmayanlar şeklinde iki sınıfa ayrılır: Gerekli olanlar, canlı organizmaların büyüme, gelişme ve fizyolojik işlevleri için ihtiyaç duydukları Mn, Fe, Ni, Cu ve Zn gibi metallerdir. Gerekli olmayanlar ise canlı organizmaların herhangi bir fizyolojik işlev için ihtiyaç duymadıkları Cd, Pb, Hg ve As gibi metallerdir. Topraktaki ağır metal konsantrasyonlarının artmasıyla bitki bünyesine alınan miktarları da artabilir. Bu durum bitkinin metabolik süreçlerini etkileyerek bitkinin büyümesi üzerinde olumsuz etki yaratabilir ya da ölümüne yol açabilir (Moosavi & Seghatoleslami, 2013).

Tablo 1: Fitoremediasyonun avantaj, dezavantaj ve sınırlılıkları (Moosavi & Seghatoleslami, 2013).

Avantajları	Dezavantaj ve Sınırlılıkları
• Çeşitli organik ve inorganik bileşiklerin gideriminde uygulanabilir • Kirlenmiş zeminler bu yöntemle yerinde ya da kazıp çıkartılarak dışarda uygun bir yerde rehabilite edilebilir. Yerinde uygulama toprağın ve çevresel ortamın daha az bozulması ve kirliliğin yayılmasının önlemesi dolayısıyla tercih edilir • Doğru uygulandığında çevre dostu, yeşil ve estetik bir teknolojidir. Diğer rehabilitasyon yaklaşımlarının pahalı ve etkisiz kalabileceği geniş alanlar için uygundur • Pahalı ekipman ve ileri uzmanlaşmış personel gerektirmez, uygulaması nispeten kolaydır • Geleneksel temizleme teknolojilerine kıyasla düşük maliyetlidir • Yerinde uygulandığından bertaraf alanlarına gerek yoktur • Geleneksel yöntemlere göre daha estetik olduğu için halk tarafından kabul görme olasılığı daha yüksektir • Birden fazla kirletici türüyle kirlenmiş alanları rehabilite etme potansiyeline sahiptir • Rüzgâr ve su hareketleri nedeniyle olabilecek sızıntı ve toprak erozyonunun önlenmesiyle kirleticilerin hava ve su ekosistemine taşınımı azaltılır	• Giderim, kullanılan bitkilerin köklenme derinliğiyle sınırlıdır • Bitkilerle kirlenmiş sahaların temizliği birkaç yıl veya daha uzun sürebilir ve kirleticiler ortamdaki tamamen giderilemeyebilir • Rehabilitasyonda istilacı, yerli olmayan türlerin kullanımı ortamdaki biyolojik çeşitliliği etkileyebilir • Rehabilitasyonda kullanılan kirlenmiş bitkilerin diğer canlılar tarafından tüketilmesi de endişe vericidir • Rehabilitasyon sonrası kirleticiyi akümüle eden bitkiler bazı durumlarda tehlikeli atık vasfında olabilir ve vassına uygun şekilde toplanması, taşınması ve bertarafı gerekebilir • Aşırı derecede kirlenmiş alanlardaki bitki örtüsünü korumak oldukça zordur. Alandaki kirleticiler kirlenmiş bitkileri tüketen hayvanlar aracılığıyla besin zincirine girerek insan sağlığı da tehdit edilebilir • Olumsuz iklim, bitki büyümesini ve bitki kütlesini sınırlarken uygulama verimini de azaltabilir

Ağır metallerin özellikle toprak ve su ekosistemlerinden giderimi önem taşır. Bitkiler bu noktada kilit rol üstlenmektedir.

1.2 Fitoremediasyonda Bitki Uygulamaları

Bitkiler, kökleriyle genellikle suda çözünen kirleticileri bünyelerine alır. Bu kirleticileri dokuları yardımıyla metabolize edilebilir, depolayabilir ya da uçucu bileşiklere dönüştürebilirler. Bu bağlamda güneş enerjisiyle çalışan pompalama ve filtreleme sistemleri olarak işlev görürler. Fitoremediasyonda kirletici giderimi sadece bitki metabolizması ile sınırlı olmayıp dolaylı olarak bitkilerle ilişkili mikropların metabolik reaksiyonları ve kirlenmiş ortamda bitki kaynaklı değişiklikler gibi karmaşık mekanizmalarla da gerçekleşebilir (Moosavi & Seghatoleslami, 2013; Singh & Jain, 2003).

Yapılan araştırmalar en az 45 bitki ailesinden yaklaşık 400 bitki türünün metalleri aşırı biriktirebildiğini göstermektedir. Bu bağlamda *Brassicaceae* (Turpgiller), *Fabaceae* (Baklagiller), *Euphorbiaceae* (Sütleğengiller), *Asteraceae* (Papatyagüller), *Lamiaceae* (Ballıbabagiller) ve *Scrophulariaceae* (Sıraca otugiller) en önemli bitki aileleri olarak sayılabilir. Literatürde yapılan araştırmalar genel olarak *Thlaspi*, *Brassica*, *Sedum alfredii* H. ve *Arabidopsis* türleri üzerinde yoğunlaşmıştır (Moosavi & Seghatoleslami, 2013; Lone, He, Stoffella, & Yang, 2008).

Fitoremediasyon uygulamasının başarısı temelde yüksek miktarda ağır metal biriktirme (hiperakümülayon) yeteneğine sahip bitkilerin seçimine bağlıdır. Fitoremediasyonda 2 yaklaşım vardır. Bunların ilki nispeten düşük miktarda yer üstü biyokütlesi üreten ancak bir veya daha fazla elementi yüksek miktarda biriktiren hiperakümülatörlerin (*Thlaspi caerulescens* veya *Alyssum bertolonii* gibi) uygulanmasıdır. İkinci yaklaşımda ise biyokütle üretimi yüksek ama hedef elementleri biriktirme yeteneği daha düşük bitkilerin kullanılmasıdır. Burada elementlerin toplam alımı, yüksek yer üstü biyokütle üretimi sebebiyle hiperakümülatörlerinkine benzerdir. Hiperakümülatörler, metal açısından zengin topraklarda yetiştirildiğinde sürgünleri kg kuru ağırlık başına 100 mg üzeri Kadmiyum (Cd), 1000 mg üzeri Nikel (Ni), Kurşun (Pb) ve Bakır (Cu) veya 10000 mg Çinko (Zn) ve Mangan (Mn) içeren bitki türleri" olarak tanımlanmaktadır. 400'den fazla bitki türü metal hiperakümülatörleri olarak tanımlanmış olup büyüme hızlarının yüksek olması, stres ortamına daha uyumlu olma ve biyokütle üretiminin yüksek olması önemli özellikleridir. Bu

nedenle otlar, çalılar veya ağaçlardan daha çok fitoakümülyasyon için tercih edilmişlerdir (Moosavi & Seghatoleslami, 2013).

Kirleticilerin remediasyonunda kullanılan mekanizmaların tanımları, avantaj ve dezavantajları Tablo 2’de verilmiştir (Jeevanantham, ve diğerleri, 2019; Singh & Jain, 2003; Pandey & Bajpai, 2018).

Fitoremediasyonla ilgili toprak ve su kaynaklarında farklı kirleticilerin giderimine yönelik birçok çalışma mevcuttur.

Çin’in Hangzhou Eyaletinde yer alan Guxin Nehri üzerinde yapılan çalışmada Fitoremediasyonun su kirliliğinin giderimindeki etkinliği incelenmiştir. Bu amaçla kalın bambu tüplerle yüzen bir yatak inşa edilmiş ve *Eichornia crassipes* (su sümbülü) ve *Lolium perenne* L’nin (İngiliz çimi) nehirde tespit edilen su kirliliğinin giderimindeki etkinliği değerlendirilmiştir. Her 2 türde sırayla yüzen yatağa ekilmiştir. Sonuçlar kurulan sistemin nehirde amonyak azotu (NH₃-N), KOİ ve toplam fosforu (TP) sırasıyla %48,6, %20,0 ve %63,3 oranında giderdiğini ve fitoremediasyon kirli nehirden organik maddeyi uzaklaştırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir (Wang, Zhang, & Cai, 2011).

Fitoremediasyon, terk edilmiş evsel ya da endüstriyel amaçlı alanların ıslahında da uygun maliyetli ve doğa tabanlı bir çözümdür. Bu tarz kirlenmiş alanlarda kendiliğinden büyüyen bitkiler fitoekstraksiyon veya fitostabilizasyon uygulamalarında değerlendirilebilmektedir. Konuyla ilgili yapılan bir çalışmada, kentsel terk edilmiş bir alanın ıslahı için alanda kendiliğinden yetişmiş *Acer pseudoplatanus* L (*A.pseudoplatanus*) ile *Betula celtiberica* Rothm. & Vasc (*B. celtiberica*) ağaçlarının ve *Buddleja davidii* Franch (*B. davidii*) çalısının fitoremediasyon potansiyeli belirlenmiştir. Alan içi ve dışından alınan toprak ve bitki örneklerindeki As, Cu ve Zn konsantrasyonları ölçülmüş ve ardından fitoremediasyonla ilgili çeşitli endeksler hesaplanmıştır. Translokasyon faktörü ve transfer katsayısı, terk edilmiş alanın dışındaki bitki örtüsünün fitoekstraksiyon kapasitesine sahip olduğunu, alanın içindeki aynı bitkilerin ise fitostabilizasyon özellikleri gösterdiğini işaret etmektedir (Fernández-Braña, ve diğerleri, 2023).

Tablo 2: Kirleticilerin remediasyonunda kullanılan mekanizmaların tanımları, avantaj ve dezavantajları

Fitoremediasyon Mekanizması	Tanım	Avantajlar	Dezavantajlar
Fitoeekstraksiyon	Kirleticilerin (metaller, radyonüklitler ya da organik bileşikler) topraktan giderilerek bitkilerin hasat edilebilir kısımlarında konsantrasyon şeklinde biriktirilmesi	Geleneksel yöntemlere göre düşük maliyetlidir Proses sonucunda atık çıkışı %95'e kadar azalır Bazen kirleticiler yeniden kullanılabilir Kirleticiler her zaman topraktan atılır Doğal hiperakümülatör bitkiler normal bitkilere göre 10-500 kat daha yüksek seviyede element biriktirebilirler	Hiperakümülatör bitkiler haricinde akümülatörler ve diğer bitkilerde köklere yerleşen metal miktarı ve köklerin metal alım oranı düşük kalabilir. Hiperakümülatör için bitkilerin kuvvetli şekilde büyümesi (> 3ton kuru madde/hektar) ve dokuda kirleticinin yüksek miktarda (>1000 mg/kg) biriktirilmesi gerekir Hasat edilen biyokütle uygun şekilde bertarafı gerekir
Fitostabilizasyon	Toprak ve yeraltı suundaki kirleticilerin, bitkilerin köklerine adsorpsiyonu ya da birikim yoluyla veya kök bölgesinde çökelme yoluyla hareketsizleştirildiği fitoremediasyonun ilk mekanizmasıdır	Riskli malzeme ya da biyokütle transferi gerekmez Kirleticiler hızlı şekilde stabilize edilir	Kirleticiler toprakta kalır Geniş kapsamlı arıtma/toprak revizyonlarında kullanılır Zorunlu kontrol gereklidir
Fitodegradasyon	Toprak ya da sudan alınan kirleticilerin bitki bünyesinde metabolik süreç yoluyla parçalanarak daha az toksik ya da toksik olmayan bileşiklere parçalanması işlemidir	Doğal ve mali yönden de kullanıcı dostudur.	Sonuç almak için birden fazla gelişim mevsimi gerekir Toprakta en az 90 cm, su da 3 metre derinlik olmalıdır Doğadaki diğer canlıların bitkileri tüketmesi ile kirleticiler besin zincirine geçebilir Sadece organik kirleticilerin giderimi ile sınırlıdır

Rizodegradasyon	Bitkilerin köklerini çevreleyen toprak alandaki ağır metal ve organik kirleticilerin parçalanması sürecidir	Yerinde gerçekleştirilen bir uygulamadır. Kirletici tamamen mineralize edilebilir. Kurulum ve bakım giderleri düşüktür.	Kirleticinin geniş kök bölgesinde ilerlemesi zaman alır. Toprağın fiziksel yapısı nedeniyle bitki kök derinliği sınırlı kalır. Kirletici yerine karbon kaynağı bitki bünyesinde daha fazla kullanılır bu da kirleticinin biyoparçalanabilirliğini azaltır.
Fitovolatilizasyon	Bitkilerin yapraklarında biriken uçucu kirleticilerin terleme yoluyla atmosfere atılmasıdır.	Yöntemde partikül formdaki Cıva daha az zararlı esansiyel forma (yaşam için gerekli) dönüşür.	Kirleticiler vejetasyonda birikebilir. Bitki dokusunda kirletici miktarının düşük olduğu rapor edilmiştir. Yöntemle havaya salınan cıva muhtemelen yağışla tekrardan yeryüzüne düşecek ve göl ve denizlerde depolanarak mikroorganizmalar tarafından Metil-Cıva üretiminde tekrar kullanılacaktır.
Rizofiltrasyon	Kirlemiş sularda bulunan kirleticiler bitki kökleri tarafından emilir veya bitki köklerine adsorbe edilir.	Yerinde ve dışarıda yapılan uygulamalarda hem karasal hem okyanus bitkileri kullanma kapasitesi sunar. Kirleticiler sürgünlere taşınmaz.	pH'nın sürekli ayarlanması gereklidir. Bitkiler başlangıçta başka yerde yetiştirilip alana transfer edilebilir. Zaman zaman bitkiler toplanıp yerine yeni bitkiler aktarılır.
Fitoakümülyasyon	Kirleticilerin bitki dokularının yapraklar, gövde ve kök gibi farklı kısımlarında depolanmasıdır.	Metaller depolanırken daha az toksik formlarına dönüştürülebilir.	Bitkilerde biriken metal konsantrasyonuna göre klorofil içeriği azalabilir ve fotosentezi etkilenebilir. Biriken metallerin toksik özelliği dolayısıyla hiperakümülatörde depolama sınırlı kalabilir.

Toprak ve yeraltı suyunun antropojenik kaynaklarla kirlenmesi Tanzanya gibi az gelişmiş ülkeler yanında gelişmekte olan ülkelerde de büyük bir endişe kaynağıdır. Özellikle kent merkezlerinde evsel katı atıkların vahşi depolanması oluşan sızıntı suları yanında tarımsal amaçlı pestisit kullanımındaki artış toprak ve su kaynaklarında kirlenmeye neden olmuştur. Ayrıca son yıllarda ülkenin birçok yerinde artan madencilik faaliyetleri kaynaklı asit maden drenajları da toprak ve su kirliliğini artırmaktadır Tanzanya’da nüfusun %30’undan fazlasının su kaynağı olarak yeraltı suyunu kullanmak zorundadır. Bu bağlamda kirlenmiş alanların rehabilitasyonunda geleneksel yöntemler pahalı olduğu kadar uygulamada zaman zamanda yetersiz kalabilmekte bazen ise uygulanması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle alternatif yöntemler araştırılmakta olup bu birini de fitoremediasyon teknolojisi oluşturmaktadır (Mwegoha, 2008).

KAYNAKÇA

- Lee, J. H. (2013). An Overview of Phytoremediation as a Potentially Promising Technology for Environmental Pollution Control. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 18, 431-439. doi:10.1007/s12257-013-0193-8
- Moosavi, S. G., & Seghatoleslami, M. J. (2013). Phytoremediation: A review. *Advance in Agriculture and Biology*, 1(1), 5-11.
- Mwegoha, W. (2008). The use of phytoremediation technology for abatement soil and groundwater pollution in Tanzania: opportunities and challenges. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 10(1), 140-156.
- Butcher, D. J. (2009). Phytoremediation of Lead in Soil: Recent Applications and Future Prospects. *Applied Spectroscopy Reviews*, 44(2), 123-139. doi:10.1080/05704920802352580
- Fernández-Braña, A., Salgado, L., Gallego, J. R., Afif, E., Boente, C., & Forján, R. (2023). Phytoremediation potential depends on the degree of soil pollution: a case study in an urban brownfield. *Environmental Science and Pollution Research* (, 30, 67708–67719. doi:10.1007/s11356-023-26968-5
- Jeevanantham, S., Saravanan, A., Hemavathy, R. V., Senthil Kumar, P., Yaashikaa, P. R., & Yuvaraj, D. (2019). Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A survey on application and future prospects. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 264–276. doi:10.1016/j.eti.2018.12.007
- Lone, M. I., He, Z.-l., Stoffella, P. J., & Yang, X.-e. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 9(3), 210-220. doi:10.1631/jzus.B0710633
- Pandey, V. C., & Bajpai, O. (2018). Chapter 1-Phytoremediation: From Theory Toward Practice. *Phytomanagement of Polluted Sites Market Opportunities in Sustainable Phytoremediation* (s. 1-49). içinde Amsterdam, Netherlands: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-813912-7.00001-6
- Singh, O. V., & Jain, R. K. (2003). Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63, 128-135. doi:10.1007/s00253-003-1425-1

- Su, R., Wang, Y., Huang, S., Chen, R., & Wang, J. (2022). Application for Ecological Restoration of Contaminated Soil: Phytoremediation. *19*(13124), 1-6. doi:10.3390/ijerph192013124
- Wang, H., Zhang, H., & Cai, G. (2011). An Application of Phytoremediation to River Pollution Remediation. *Procedia Environmental Sciences*, *10*, 1904-1907. doi:10.1016/j.proenv.2011.09.298

BÖLÜM 6

BİYOKÖMÜR UYGULAMALARININ TOPRAK VE BİTKİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Murat KARAER^{1*},
Emine TOPÇU²,
Gülperin DURSUN³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16370026>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye. murat.karaer@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar), Orcid ID: 0000-0002-1920-181X

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği, Bilecik, Türkiye. emine.topcu241@gmail.com, Orcid ID: 0009-0006-0260-2592

³ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği, Bilecik, Türkiye. gulperindursun96@gmail.com, Orcid ID: 0009-0001-7212-9183

1.GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla birlikte, gıda ve enerjiye olan talep de önemli ölçüde yükselmiştir. Bu talebi karşılamak amacıyla fosil yakıt tüketiminin artması, mera ve orman alanlarının tarım arazisine dönüştürülmesi ve yoğun tarımsal faaliyetler, toprakta depolanan karbonun atmosfere salınmasına neden olarak küresel ısınmayı hızlandırmaktadır (Lal, 2004). Fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak ve enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim giderek artmaktadır. Bu çerçevede, biyokütle gibi organik atıklardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynakları hem enerji üretimine katkı sağlamakta hem de çevreye olan olumsuz etkileri azaltmaktadır (Bridgwater, 2012). Özellikle tarımsal üretim sonrası ortaya çıkan bitkisel atıkların piroliz yöntemiyle biyokömüre dönüştürülmesi, bir yandan sürdürülebilir enerji kaynağı sağlarken, diğer yandan elde edilen karbonca zengin ürünlerin toprakta kullanılmasıyla uzun vadeli karbon depolaması mümkün olmaktadır (Lehmann ve Joseph, 2024). Böylece hem toprak sağlığı iyileştirilmekte hem de iklim değişikliğiyle mücadelede önemli katkı sunulmaktadır.

Biyokömür, tarımsal artıkların oksijensiz veya az oksijenli koşullar altında karbon (C) bazlı ham materyalin karbonizasyon veya piroliz işleminden geçirildikten sonra organik materyallerin kömürleşmiş bir yapıya sahip olmasına verilen isimdir. Biyokömür; genellikle düşük sıcaklıklarda (200-900°C) termal bozulma sonucu elde edilen karbonca zengin ve çözünmeye dayanıklı bir materyaldir. Biyokömürün kökeni Amazon kara topraklarına (Black earth) dayanmaktadır. Amazon kara toprakları siyah topraklar (Terra preta) ve kahverengi (normal) topraklar (Terra mulata) olmak üzere ikiye ayrılır. Terra Preta kendine özgü siyah rengini, bünyesinde bulundurduğu; odun kömürü, kemik atığı, kırık çömlek, kompost ve çeşitli gübre karışımlarından oluşan karbonize olmuş kömür içeriğinden almaktadır (Mao ve ark., 2012; Dufour, 1990). Yapılan çalışmalarda bu toprakların 1 kilogramının yaklaşık 150 gram karbon ihtiva ettiği tespit edilmiş ve bu içeriğin yüzyıllar boyunca korunduğu belirtilmiştir (Glaser ve ark., 2002). Günümüzde bu toprak formasyonunun oluşumunda uzun yıllar boyunca insanlar tarafından toprağa yapılan farklı organik materyal ilavesinin neden olduğu düşünülmektedir.

Biyokömürlerin, gözenekli yapıda olmaları ve yüzey alanlarının büyük olmaları nedeni ile suyu tutma kapasiteleri ve katyon değişim kapasiteleri

yüksektir. Bu özelliklerine bağlı olarak toprakta katyonik etkinliği artırır ve bunun sonucunda toprak; kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi bitki besin elementlerini tutar. Biyokömür toprakta kendi ağırlığının 6 katı kadar su tutar, topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından daha kolay alınabilmesini sağlayarak toprak için iyi birer besin maddesi olur (Glaser ve Birk, 2012). Bu yetenekler özellikle çöl topraklarında tarım konusunda bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca Aromatik ve humik madde içerikleri fazladır (Lorenz ve Lal, 2014). Genel olarak biyokömür, toprağın ıslah edilmesi, bitki gübresi olarak, toprakta karbon tutulması, toprak veriminin artırılması, CO₂ ve CH₄ salınımlarının azaltılması, atık değerinde olan maddelerin enerji üretiminde kullanılması gibi faydalara sahiptir (Lorenz ve Lal, 2014). Ayrıca biyokömürler genel olarak bazik karakter gösterdikleri için toprağa eklendiğinde özellikle asitli toprakların pH değerlerini artırarak toprak pH'ını düzenlerler (Ippolito ve ark., 2014).

Farklı materyallerden farklı metotlar kullanılarak elde edilen biyokömürlerin tarımsal amaçlı toprak iyileştirici yönüyle de değerlendirildiğinde toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirme, bitki gelişimi üzerine olumlu etkileri ve tarımsal sürdürülebilirliği sağlama açısından çok önemli faydaları vardır.

2. BİYOKÖMÜRÜN TOPRAK ÜZERİNE OLAN ETKİLERİ

Biyokömür, karbon açısından zengin bir malzeme olup, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Biyokömür ilavesinin toprak üzerine olan etkileri, kullanılan biyokömürün üretim teknolojisi, fiziksel ve kimyasal özellikleri, hammaddesi (piroliz sıcaklığı, hammadde türü, agregat çapı gibi faktörler) ile toprağın kendi özellikleri (tekstür sınıfı, organik madde içeriği, başlangıç pH'sı, nem içeriği) ve iklim koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

2.1. Toprağın Fiziksel Özellikleri Üzerine Olan Etkileri

Biyokömür, gözenekli yapısı sayesinde uygulandığı toprakların fiziksel özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Özellikle su tutma kapasitesi, havalanabilirlik ve toprak yapısında sağladığı olumlu etkilerle dikkat çeker. Biyokömür toprak karışımında, düşük yoğunluğu nedeniyle toplam birim hacimdeki katı madde miktarını azaltarak toprak hacim ağırlığını düşürür

(Downie ve ark., 2012). Aynı zamanda, yüksek iç gözenekliliğe sahip olması nedeniyle toprağın toplam porozitesinde anlamlı artışlar sağladığı bildirilmektedir. Literatürde, biyokömür uygulamalarının toprak porozitesini %2 ile %40 arasında artırdığı; biyokömürün kendi porozitesinin ise kullanılan hammaddelere ve piroliz koşullarına bağlı olarak %70 ila %90 arasında değiştiği ifade edilmektedir (Lehmann ve Joseph, 2024; Laird ve ark., 2010). Ayrıca, piroliz sıcaklığı ile biyokömürün porozite özellikleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmakta olup, daha yüksek sıcaklıklarda üretilen biyokömürlerin toprak porozitesine daha fazla katkı sağladığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Keiluweit ve ark., 2010).

Toprağın su tutma yeteneğini geliştiren biyokömür; yağmur ya da sulama suyunu daha fazla kök bölgesinde tutabilir, yani daha uzun süre kök çevresinde kaldığından bitki aynı verimi elde etmek için daha az sulamaya ihtiyaç duyar bu yüzden daha az su tüketimine yardımcı olur ve toprağın yüzeyinde bir tampon görevi görerek suyun buharlaşmasını yavaşlatır. Suyun kullanılabilirliği tarımsal üretim için önemli bir parametredir. Bu konuda yapılan araştırmaların birinde kumlu topraklara uygulanan biyokömürün su tutma kapasitesini artırdığı ve kumlu topraklarda tarımsal üretim için suyun kullanılabilirliğini olumlu etkileyebileceği bildirilmiştir (Basso ve ark. 2013).

Yüksek karbon içeriğine sahip biyokömür ilavesi, toprağın tekstür sınıfına bağlı olarak toprağın gerilme kuvvetinde de azalmaya neden olur, bu da toprağın işlenebilirliğini ve kök gelişimini olumlu etkiler. Gerilme kuvveti, düşük organik madde içeriğine sahip ve sıkışmış topraklarda yüksekken, biyokömür ilavesi ile bu durum azaltılarak toprağın yapısını olumlu yönde etkileyebilir. Bu etki, toprağa eklenen biyokömür miktarına bağlı olarak değişir; Zhang ve ark. (2012)'ları tarafından yapılan çalışmaya göre %2 veya Chan ve ark. (2007)'ları tarafından yapılan çalışmaya göre 50 Mg ha⁻¹'den fazla biyokömür ilavesinin gerilme kuvvetini azalttığı bildirilmiştir.

2.2. Toprağın Kimyasal Özellikleri Üzerine Olan Etkileri

Biyokömür, toprağın kimyasal özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturarak özellikle pH düzenlenmesi, katyon değişim kapasitesi (KDK) ve besin elementlerinin tutulmasında olumlu katkılar sağlar. Uygulanan biyokömür genellikle alkali karakterde olup, bu özelliği sayesinde asidik topraklarda pH düzeyini artırarak kireçleme etkisi yaratır (Lehmann ve Joseph,

2024). Bu durum özellikle tropik bölgelerdeki asidik topraklarda bitki verimliliğinde %25'e kadar artış gibi olumlu sonuçlar doğurabilmektedir (Glaser ve ark., 2002). Ancak ılıman iklimlerde bulunan nötr ya da hafif alkali topraklarda biyokömürün pH üzerindeki etkisi sınırlı kalabilir. Toprak pH'sındaki bu artış, biyokömürün karbonat ve metal oksit içerikleri, yüzeyindeki karboksil (-COOH) ve hidroksil (-OH) gibi fonksiyonel gruplar, üretim sıcaklığı ve uygulama dozu ile yakından ilişkilidir (Yuan ve Xu, 2011). Bu fonksiyonel gruplar aynı zamanda biyokömürün katyon değişim kapasitesini artırarak topraktaki besin elementlerinin tutulmasını kolaylaştırır. Yüksek sıcaklıklarda pirolize edilen biyokömürlerin genellikle daha yüksek pH değerine sahip olduğu ve artan dozla birlikte toprak pH'sının da yükseldiği çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir. Şenay ve Tepecik (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, kontrol grubunda 7,50 olan pH değeri, 80 t ha⁻¹ biyokömür uygulamasında 7,66'ya yükselmiştir. Bununla birlikte, bazı araştırmalarda biyokömür dozundaki artışın pH üzerinde baskılayıcı ya da düşürücü etkiler oluşturabileceği de rapor edilmiştir (Biederman ve Harpole, 2013). Biyokömürün toprak pH'sında meydana getirdiği değişiklik direct veya indirect olarak hem bitki hemde mikrobiyal yaşamda önemli değişiklikler meydana getirir (Darcan ve ark. 2009).

Toprağa biyokömür ilavesi ise toprağın organik madde ve organik karbon içeriğini artırmaktadır (Lewandowski ve Zumwinkle, 1999). Biyokömür, yüksek özgül yüzey alanı, gözenekli yapısı ve yüksek yüzey yükü (katyon değişim kapasitesi) sayesinde toprağın besin tutma yeteneğini artırır. Bu sayede besin elementlerinin yıkanmasını azaltır ve bitkiler için yararlılığını artırır. Biyokömür, toprağın alınabilir fosfor miktarını önemli ölçüde artırdığı yapılan çalışmalarla da ortaya konmuştur (Oguntode ve ark. 2004).

Biyokömür, toprakta mikro besin elementlerinin mevcudiyetinde çeşitli şekillerde etkileyebilir. Yapılan çalışmalar, biyokömür uygulamalarının topraktaki alınabilir çinko (Zn), mangan (Mn), bor (B) ve bakır (Cu) düzeylerini artırabileceğini göstermektedir (Beesley ve ark., 2010; Nigussie ve ark., 2012). Ancak, özellikle demir (Fe) ve mangan (Mn) gibi elementlerin alınabilirliğinde azalma gözlemlenmektedir. Bu durum genellikle biyokömürün toprağın pH seviyesini artırıcı etkisiyle ilişkilendirilir; çünkü pH'nın yükselmesi, bu elementlerin çözünürlüğünü düşürerek bitkiler tarafından

alınabilirliğini sınırlar (Lehmann ve Joseph, 2024). Öte yandan, biyokömür toprakta kation değişim kapasitesini (KDK) artırarak kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}) ve potasyum (K^+) gibi besin elementlerinin tutulmasını kolaylaştırmakta ve bu elementlerin bitkilere yararlılığını desteklemektedir (Liang ve ark., 2006). Bu durum, biyokömürün yüzeyinde bulunan karboksil ve hidroksil gibi fonksiyonel grupların varlığına bağlı olarak artan yüzey yükü ve adsorpsiyon kapasitesiyle açıklanabilir (Yuan ve Xu, 2011).

2.3. Toprağın Biyolojik Özellikleri Üzerine Olan Etkileri

Biyokömür, gözenekli yapısı, geniş yüzey alanı ve organik madde içeriği sayesinde toprak mikrobiyal biyokütlesi ve aktivitesi üzerinde genellikle olumlu etkiler yaratır. Mikro gözenekler, mikroorganizmalara hem barınak hem de nem kaynağı sağlayarak mikrobiyal yaşamı desteklerken; biyokömürün sunduğu kolay ayrışabilir karbon fraksiyonları mikroorganizmalar için enerji kaynağı oluşturur (Lehmann ve Joseph, 2024; Thies ve ark., 2015). Ayrıca, biyokömür uygulamasıyla artan pH ve kation değişim kapasitesi, besin elementlerinin yararlılığını artırarak mikrobiyal işlevleri teşvik edebilir (Kolton ve ark., 2011).

Bununla birlikte, biyokömürün mikrobiyal topluluklar üzerindeki etkileri her zaman tutarlı değildir. Bazı çalışmalar, yüksek C:N oranı nedeniyle azot immobilizasyonu veya biyokömürün yaşlanması gibi nedenlerle mikrobiyal aktivitenin sınırlanabileceğini ortaya koymuştur (Spokas ve Reicosky, 2009). Toprak enzimleri açısından ise özellikle dehidrojenaz, üreaz ve fosfataz gibi aktivitelerde artış rapor edilmiştir; ancak bu artış, biyokömürün kaynağına, üretim sıcaklığına ve toprak özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Azot döngüsü üzerinde de karmaşık etkiler bildirilmiş; bazı çalışmalar nitrifikasyonun arttığını, bazıları ise azot kaybı ya da gaz salımı nedeniyle baskılandığını göstermiştir (Clough ve Condrón, 2010). Rizosfer bölgesinde biyokömür, bitki-mikrop etkileşimini olumlu yönde etkileyebilirken, simbiyotik ilişkilerde bozulmalara neden olabilmektedir.

3. BİYOKÖMÜRÜN BİTKİ GELİŞİMİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Biyokömür, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek bitki gelişimini doğrudan ve dolaylı yollarla destekleyen bir toprak

düzenleyicisidir. Besin elementlerinin yarıyışlılığını artırması, su tutma kapasitesini iyileştirmesi, mikrobiyal aktiviteyi teşvik etmesi ve stres koşullarına karşı bitki direncini artırması sayesinde verim ve biyokütle artışı sağlayabilir. Ancak bu etkiler, biyokömürün özellikleri, uygulama dozu ve toprak tipi gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Lehmann ve Joseph, 2024; Biederman ve Harpole, 2013).

Biyokömür, toprağın kimyasal özelliklerini iyileştirerek bitki besin elementlerinin daha etkin bir şekilde alınmasını sağlar. Özellikle katyon değişim kapasitesini (KDK) artırması sayesinde kalsiyum (Ca^{2+}), magnezyum (Mg^{2+}), potasyum (K^{+}) gibi makro besin elementleri toprakta daha uzun süre tutulur ve kök bölgesine daha fazla sunulur (Lehmann ve Joseph, 2024). Ayrıca biyokömür, toprak mikrobiyal faaliyetlerini destekleyerek organik maddenin mineralizasyonunu ve bu yolla azot (N) ve fosfor (P) gibi elementlerin bitkiler için yarıyışlı hale gelmesini kolaylaştırır (Glaser ve ark., 2002). Fosfor bağlanmasını azaltarak alınabilir fosfor miktarını da artırabileceği gösterilmiştir (Liang ve ark., 2006).

Biyokömürün sahip olduğu yüksek porozite, düşük yoğunluk ve su tutma kapasitesi, kök gelişimi için ideal bir ortam sunar. Bu yapı, köklerin daha derin ve yaygın şekilde büyümesini teşvik ederken, oksijenin kök bölgesine ulaşmasını da kolaylaştırır (Prendergast-Miller ve ark., 2014). Ayrıca biyokömür, rizosfer bölgesinde mikrobiyal çeşitliliği artırarak kök-mikrop etkileşimlerini geliştirir; bu da özellikle mikoriza gibi faydalı simbiyotik ilişkilerin kurulmasına katkı sağlar (Kolton ve., 2011). Böylece, bitkiler su ve besin kaynaklarına daha etkili erişim sağlar.

Biyokömür, çevresel stres koşullarında bitki direncini artıran önemli bir toprak katkı maddesidir. Kuraklık koşullarında, biyokömürün yüksek su tutma kapasitesi sayesinde bitkiler susuzluğa karşı daha dayanıklı hale gelir (Akhtar ve ark., 2015). Tuzluluk stresine karşı ise biyokömür, sodyum (Na^{+}) gibi zararlı iyonları adsorbe ederek bu iyonların kök bölgesine ulaşmasını engelleyebilir (Beesley ve ark., 2010). Ağır metal bulaşmış topraklarda ise kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) gibi toksik metallerin biyoyararlanabilirliğini azaltarak bitkilerde birikmesini sınırlar (Sevgi ve Leblebici, 2022). Bu etkiler, hem doğrudan adsorpsiyon mekanizmasıyla hem de toprak pH'sının düzenlenmesi yoluyla gerçekleşir (Fellet ve ark., 2011).

4. TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİLERİ

Biyokömür, tarımsal sürdürülebilirliğe katkı sağlayan çok yönlü bir toprak iyileştirici olarak öne çıkmaktadır. Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini olumlu yönde etkileyerek, iklim değişikliğiyle mücadelede katkıda bulunmakta ve organik tarım uygulamalarını desteklemektedir (Günel ve Erdem, 2018).

Fiziksel açıdan değerlendirildiğinde, biyokömürün toprak yapısını iyileştirici etkileri dikkat çekicidir. Özellikle killi topraklarda su akışını düzenleme kapasitesi sayesinde rüzgâr ve su erozyonunu azaltır. Aynı zamanda, toprakta uzun süreli karbon depolanmasını sağlayarak hem toprak sağlığına hem de çevresel sürdürülebilirliğe hizmet eder (Altıkat ve Alma, 2021).

Biyokömürün yüksek karbon içeriği (%60–80) ve çözünmeye karşı dirençli yapısı, onu kararlı karbon depolama açısından ideal bir materyal haline getirir. Toprağa biyokömür ilavesi, organik karbon düzeyini artırmakta ve bu sayede küresel ısınmanın azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Amazon bölgesinde bulunan Terra Preta gibi tarihi örnekler, biyokömürün yüzyıllar boyunca toprakta karbonu tutabildiğini göstermekte, bu da biyokömürün karbon yönetiminde uzun vadeli bir araç olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Günel ve Erdem, 2018).

İklim değişikliğiyle mücadelede biyokömür, sera gazı emisyonlarını azaltma yönüyle de önemli bir rol üstlenmektedir. Toprakta atmosfere yayılan CO₂ emisyonlarını düşürmenin yanı sıra, organik gübrelerle birlikte kullanıldığında metan (CH₄) salınımını da önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca denitrifikasyon sürecini etkileyerek azot oksit (N₂O) emisyonlarının azaltılmasına katkı sunar (Işık ve Dilek, 2022).

Besin yönetimi açısından bakıldığında, biyokömür uygulamaları azotlu gübrelerin buharlaşma, yıkanma ve yüzey akışıyla kaybını azaltarak, bitkilerin besin kullanım etkinliğini artırır. Fosforun çözünürlüğünü artırarak ve kök gelişimini destekleyerek yarıyışlılığını artırabilir. Toprağın katyon değişim kapasitesini (KDK) geliştirerek besin elementlerinin tutulmasını kolaylaştırır (Namlı, Akça ve Akça, 2017; Elmasoğlu ve ark., 2022).

Organik tarım uygulamalarında biyokömür, toprağın verimliliğini artıran ve kimyasal girdi ihtiyacını azaltan etkili bir katkı maddesi olarak

değerlendirilmektedir. Toprak kalitesini iyileştirerek bitki gelişimini destekler; bazı mantar türlerinin artışına katkıda bulunarak faydalı mikrobiyal dengeyi güçlendirebilir. Ayrıca patojen baskılayıcı ve fitotoksik bileşikleri adsorbe edici özellikleri sayesinde bitki sağlığını olumlu yönde etkileyebilir (Yılmaz ve Kurt, 2018).

Toprak pH'sı üzerinde de etkili olan biyokömür, özellikle asidik topraklarda kireçleme etkisi göstererek besin elementlerinin (P, K, Ca, Mg, Zn vb.) alımını kolaylaştırabilir. Ancak tropikal bölgelerde yüksek pH değerinin bazı mikro besinlerin (Fe, Mn, B, P) bitki tarafından alımını engelleyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Arın & Coşkan, 2021).

Biyokömür, mikrobiyal biyokütle ve enzim aktiviteleri (üreaz, fosfatazlar, dehidrojenaz vb.) üzerinde de olumlu etkiler gösterebilir. Ancak bu etkiler, kullanılan biyokömürün özelliklerine, toprağın yapısına ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Özellikle biyokömürün yaşlanması, toksik bileşik salımı gibi faktörler mikrobiyal faaliyetler üzerinde olumsuz sonuçlara yol açabilir (Abdul-Aziz, 2020; Şenay ve Tepecik, 2024).

Bu nedenlerden dolayı biyokömür, doğrudan bir gübre değil, bitki gelişim ortamını iyileştiren bir katkı maddesi olarak değerlendirilmelidir. Özellikle hayvan gübresi gibi organik gübrelerle birlikte uygulandığında toprak özelliklerini daha da iyileştirdiği; sinerjistik etkiler oluşturarak besin kayıplarını azalttığı ve mikrobiyal aktiviteyi artırdığı görülmektedir (Işık ve Dilek, 2022; Yılmaz ve Kurt, 2018).

Ancak biyokömürün toprak üzerindeki etkilerini net bir şekilde belirleyebilmek adına uzun vadeli tarla denemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Zira mevcut literatürdeki çalışmaların çoğu kısa süreli ve laboratuvar ya da sera koşullarında yapılmıştır. Farklı toprak koşullarında, çeşitli biyokömür türlerinin, farklı gübreleme uygulamalarıyla birlikte değerlendirilmesini içeren kapsamlı araştırmalar, biyokömürün tarımsal sürdürülebilirlikteki yerinin daha net belirlenmesini sağlayacaktır (Şenay ve Tepecik, 2024; Elmasoğlu ve ark., 2022).

5.SONUÇ

Biyokömür, toprak sağlığının korunması, bitki gelişiminin desteklenmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli potansiyele sahip bir toprak iyileştiricisidir. Gerek fiziksel ve

kimyasal toprak özellikleri üzerine olan olumlu etkileri, gerekse mikrobiyal yaşamı destekleyici işlevi sayesinde tarımsal üretimde verimlilik ve direnç artışı sağlamaktadır. Aynı zamanda, karbonu toprakta uzun süreli olarak depolayabilme yeteneği ve sera gazı salımlarını azaltıcı etkisi ile iklim değişikliğiyle mücadelede de katkı sunmaktadır (Lehmann ve Joseph, 2024; Biederman ve Harpole, 2013).

Ancak biyokömürün etkileri, kullanılan biyokütle türüne, üretim koşullarına, uygulama dozuna ve toprak özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, biyokömürün tarımsal sistemlerdeki rolünün daha net belirlenebilmesi için uzun vadeli ve yerel koşulları dikkate alan araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Cayuela ve ark., 2014). Uygun kullanım stratejileriyle biyokömür, sürdürülebilir tarıma katkı sağlayan etkili ve çevre dostu bir uygulama olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdul-Aziz, A. L. (2020). Biyokömürün toprağın biyolojik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- Akhtar, S. S., Andersen, M. N., & Liu, F. (2015). Biochar mitigates salinity stress in potato. *Journal of agronomy and crop science*, 201(5), 368-378.
- Altıkat, A., & Alma, M. H. (2021). Biyokömür ve Toprak Fiziksel Özellikleri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 2599-2612.
- Arın, A., & Coşkan, A. (2021). Biyokömür uygulamalarının karadeniz bölgesi toprağının pH'sına ve bazı biyolojik aktivite parametrelerine etkileri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 24(6), 1604-1616.
- Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & Westgate, M. (2013). Assessing potential of biochar for increasing waterholding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*, 5(2), 132-143.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2010). Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental pollution*, 158(6), 2282-2287.
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy*, 5(2), 202-214.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Cayuela, M. L., Van Zwieten, L., Singh, B. P., Jeffery, S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191, 5-16.
- Chan, K.Y., Dorahy, C., & Tyler, S. (2007) Determining the agronomic value of composts produced from garden organics from metropolitan areas of New South Wales, Australia. *Animal Production Science* 47(11): 1377-1382.

- Clough, T. J., & Condron, L. M. (2010). Biochar and the nitrogen cycle: introduction. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1218-1223.
- Darcan, C., Özkanca, R., İdil, Ö. (2009) The role of RpoS, H-NS and AcP on the pH-dependent OmpC and OmpF porin expressions of *Escherichia coli* at different pH. *African Journal of Biotechnology* 8 (9)
- Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P. (2012). Physical properties of biochar. In *Biochar for environmental management* (pp. 45-64). Routledge.
- Dufour, D. L. (1990). Use of tropical rainforests by native Amazonians. *BioScience*, 40(9), 652-659.
- Elmasoğlu, C., Kumral, F. E., Şimşek, B., & Akpınar, Ç. (2022). Tarımsal atıklardan elde edilen biyokömürün toprak kalitesi üzerine etkisi. *Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2(2), 328-338.
- Fellet, G., Marchiol, L., Delle Vedove, G., & Peressotti, A. (2011). Application of biochar on mine tailings: effects and perspectives for land reclamation. *Chemosphere*, 83(9), 1262-1267.
- Glaser, B., & Birk, J. J. (2012). State of the scientific knowledge on Terra Preta soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 39–51
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and fertility of soils*, 35, 219-230.
- Günel, E., & Erdem, H. (2018). Biyokömür; tanımı, kullanımı ve tarım topraklarındaki etkileri. *ADÜ Ziraat Dergisi*, 15(2), 87-93.
- Ippolito, J. A., Stromberger, M. E., Lentz, R. D., & Dungan, R. S. (2014). Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status. *Journal of Environmental Quality*, 43(2), 681-689.
- Işık, S., & Dilek, E. (2022). Ahır gübresi biyokömürünün toprağın bazı kimyasal özellikleri ve mısır bitkisinin gelişimi üzerine etkileri. *International Journal of Agricultural and Life Sciences*, 7(1), 16-29.
- Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G., & Kleber, M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*, 44(4), 1247–1253.
- Kolton, M., Meller Harel, Y., Pasternak, Z., Graber, E. R., Elad, Y., & Cytryn, E. (2011). Impact of biochar application to soil on the root-associated

- bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants. *Applied and environmental microbiology*, 77(14), 4924-4930.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2024). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Taylor & Francis.
- Lewandowski, A. & Zumwinkle, M. (1999). Assessing the soil system: a review of soil quality literature. Minnesota Department of Agriculture, Energy and Sustainable Agriculture Program, ss. 1-63.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Sohi, S., Thies, J. E., Skjemstad, J. O., ... & Neves, E. G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 177(5), 651-670.
- Mao, J. D., Johnson, R. L., Lehmann, J., Olk, D. C., Neves, E. G., Thompson, M. L., & Schmidt-Rohr, K. (2012). Abundant and stable char residues in soils: implications for soil fertility and carbon sequestration. *Environmental science & technology*, 46(17), 9571-9576.
- Namlı, A., Akça, M. O., & Akça, H. (2017). Tarımsal atıklardan elde edilen biyokömürün buğday bitkisinin gelişimi ve bazı toprak özellikleri üzerine etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 5(1), 39-47.
- Nigussie, A., Kissi, E., Misganaw, M., & Ambaw, G. (2012). Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, 12(3), 369-376.
- Oguntunde, P. G., Fosu, M., Ajayi, A. E. & Van de Giesen, N. (2004). Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 39(4), 295-299.

- Prendergast-Miller, M. T., Duvall, M., & Sohi, S. P. (2014). Biochar–root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European journal of soil science*, 65(1), 173-185.
- Şenay, B., & Tepecik, M. (2024). Biyokömür uygulamalarının toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile buğdayın (*Triticum aestivum* L.) çimlenme ve biyomas üzerine etkisinin belirlenmesi. *Journal of Tekirdağ Agricultural Faculty*, 21(2), 299–307.
- Şenay, B., & Tepecik, M. (2024). Biyokömür uygulamalarının toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile buğdayın (*Triticum aestivum* L.) çimlenme ve biyomas üzerine etkisinin belirlenmesi. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 21(2), 299-309.
- Sevgi, K., & Leblebici, S., (2022) Bitkilerde ağır metal stresine verilen fizyolojik ve moleküler yanıtlar. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 7 (4), 528-536
- Spokas, K. A., & Reicosky, D. C. (2009). Impacts of biochar on soil greenhouse gas emissions. *Annals of Environmental Science*, 3, 179–193.
- Spokas, K. A., & Reicosky, D. C. (2009). Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Annals of Environmental Science*, 3, 179–193.
- Thies, J. E., Rillig, M. C., & Graber, E. R. (2015). Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 327-389). Routledge.
- Yılmaz, F. I., & Kurt, S. (2018). Biyokömür ve vermikompost uygulamalarının toprağın bazı biyolojik özellikleri üzerine etkisi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 6(2), 143-150.
- Yuan, J. H., & Xu, R. K. (2011). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil use and management*, 27(1), 110-115.
- Zhang, A.F., Bian, R.J., Pan, G.X., Cui, L.Q., Hussain, Q., Li, L.Q., Zweng, J., Zheng, X., Han, X., Yu, X. (2012) Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 127: 153-160.

BÖLÜM 7

KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TAHILLAR

Dr. Yusuf Murat KARDEŞ^{1*}

Prof. Dr. Mahmut KAPLAN²

Dr. Beyza ÇİFTÇİ³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16370253>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik, Türkiye. yusufmurat.kardes@bilecik.edu.tr (* Sorumlu yazar), Orcid ID: 0000-0001-7144-9612

² Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Kayseri, Türkiye. mahmutkaplan5@hotmail.com, Orcid ID: 0000-0002-6717-4115

³ Erciyes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Kayseri, Türkiye. beyzacftc.58@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-3080-0880

GİRİŞ

Tahıllar, gelişme dönemleri süresince ihtiyaç duydukları sıcaklık ve nem koşullarına göre genel olarak serin iklim (buğday, arpa, yulaf, çavdar ve tritikale) ve sıcak iklim (Mısır, çeltik, sorgum, darılar ve kuş yemi) tahılları olarak iki ana gruba ayrılır (Kardeş vd., 2019). Serin iklim tahılları gelişme dönemlerinde sıcak iklim tahıllarına göre daha düşük sıcaklık isteğine sahiptir. Ayrıca serin iklim tahıllarının generatif döneme geçebilmek için ilk gelişme dönemlerinde belirli bir süre düşük sıcaklıkta (1-5° C) vernalize olmaları sıcak iklim tahıllarına göre daha belirgindir (Geçit ve İncikarakaya, 2009). Serin iklim tahılları düşük sıcaklıklara sıcak iklim tahıllarına göre daha dayanıklı iken sıcak iklim tahılları ise birim kuru madde üretmek amacıyla suyu daha verimli kullanabilmektedirler.

Tahıl üretimi; sıcaklık, nem ve güneş ışığı gibi temel iklimsel faktörlerle tarımsal uygulamalar arasındaki etkileşimlere dayanmaktadır. Ancak iklim sistemi parametrelerinde meydana gelen değişiklikler, tahıl üretimindeki verimliliği tehdit etmektedir. İklim-bitkisel üretim ilişkisi hem optimum koşullarda doğal bir kaynak olarak iklimin olumlu etkilerini hem de aşırı sıcaklık ve nem yetersizliği gibi durumlarda fotosentez ve verim üzerindeki olumsuz etkilerini içermektedir (Tarariko vd., 2022). Yüksek enlem bölgelerindeki tahıl üretiminin iklim değişikliğinin neden olduğu uzun vejetasyon döneminden olumlu yönde faydalanması beklenirken, Afrika, Orta Doğu, Güney ve Güney Doğu Asya’ da ise kuraklık olasılığı sebebiyle verimliliğin azalması beklenmektedir (Goncharov vd., 2023).

İklim değişiklikleri tahıl üretiminde önemli faktörlerden biri olan su varlığını da etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, buharlaşma oranlarını yükseltmekte, yağış rejimlerinde meydana gelen düzensizlikler ise hem suyun zamanında teminini hem de toplam su miktarını olumsuz etkilemektedir. Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde, sulama suyu kaynaklarının azalması tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini riske atmaktadır. IPCC (2022)’ nin raporuna göre, küresel ısınmanın 2°C’yi aşması durumunda birçok bölgede tarımsal su talebi artarken, su arzı önemli ölçüde azalacaktır. Dolayısıyla iklim değişikliğine karşı uyum stratejileri geliştirilmeksizin tarımsal üretim sistemlerinin su güvencesi sağlanamayacaktır (IPCC, 2021; Elliott vd., 2014).

1. TAHILLARIN ÖNEMİ

Buğdaygiller- *Graminea* familyası içerisinde yer alan tahıllar dünya genelinde ekili tarım alanlarının yaklaşık %49.6'sında yetiştirilmeleri ve büyük oranda gıda ile hayvan yemi üretiminde kullanılmaları nedeniyle küresel ölçekte en önemli temel gıda kaynakları arasında yer almaktadır (FAO 2023). Tahıllar dünya üzerinde yaklaşık 730 milyon ha alanda yetiştirilmekte ve yaklaşık 3 milyar 120 milyon ton üretimi yapılmaktadır. Tahıllar dünyada üretim miktarı bakımından kültür bitkileri arasında ilk sırada yer almaktadır. Serin iklim tahılları arasında buğday, sıcak iklim tahılları arasında ise Mısır en çok ekimi ve üretimi yapılan tahıldır. (FAO 2023) (Çizelge 1).

Çizelge 1. Tahılların dünya üzerinde ekim alanı ve üretim miktarları

Serin İklim Tahılları	Ekilen alan (Milyon ha)	Üretim Miktarı (Milyon t)
Buğday	220.41	798.98
Arpa	46.25	145.76
Yulaf	8.02	18.78
Çavdar	3.98	12.68
Tritikale	3.60	13.80
Toplam	282.26	990.00
Sıcak İklim Tahılları		
Mısır	208.23	1241.56
Çeltik	168.36	800.00
Sorgum	39.85	57.30
Darılar	31.33	31.60
Kuşyemi	0.24	0.20
Toplam	448.02	2130.66
Tahıl Toplamı	730.28	3120.66

Tahıllar, vücudun düzgün işleyişi için gerekli olan mineraller, karbonhidratlar, vitaminler, proteinler ve mikro besin öğeleri bakımından önemli bir kaynaktır. Fiyatlardaki artış nedeniyle, kişi başı yıllık tahıl tüketimi gelişmekte olan ülkelerde 166 kg iken gelişmiş ülkelerde 133 kg düzeyindedir. Tahıllar güvenilir bir kalori kaynağı olarak kabul edilir. Gelişmekte olan ve

gelişmiş ülkelerde tahıllardan alınan kalori sırasıyla %60 ve %30'dur. (Farooq vd., 2023).

Tahıllar, yüksek kaliteli karbonhidratların yanı sıra lif, B vitaminleri, proteinler ve antioksidanlar gibi birçok yararlı bileşen içermeleri nedeniyle sağlıklı beslenmenin temel unsurlarındandır. (Pal and Molnar, 2021). Tahılların günlük beslenmenin bir parçası olması gerektiği ve diyetlere katılmasının sağlık açısından faydalarını belirtilen çalışmalar yapılmıştır (Shavanov, 2021). Ayrıca tahılların tüketiminin obezite, kardiyovasküler hastalıklar, alzheimer, tip II diyabet gibi kronik hastalıkların ve bazı kanserlerin önlenmesinde etkili olduğunu göstermektedir (Liu 2004). Bunun asıl nedeninin tahılların içerdiği fitokimyasallardan kaynaklandığı bildirilmiştir (Okarter vd., 2010).

Buğday, mısır ve çeltik gibi tahıllar, dünya nüfusunun büyük bir kısmı için temel gıda olmaları nedeniyle birincil ürünler olarak kabul edilmektedir. 2050 yılına kadar, 9.8 milyara ulaşması beklenen dünya nüfusunun beslenebilmesi için tahıl arzında %70 ila %100 oranında bir artış gerektiği bildirilmektedir (Godfray vd., 2010). Artan talebin karşılanabilmesi için üretim oranlarının yükseltilmesi genel kabul görmüş bir çözüm olarak öne çıksa da, verimli ve ekilebilir arazilerde küresel bir azalma nedeniyle, iklim değişikliği senaryosu altında mevcut tarımsal uygulamalarla küresel gıda talebini karşılamak oldukça zorlaşmıştır (Ray vd., 2013; Wang vd., 2018; Chadalavada vd., 2021).

2. KÜRESEL İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ

İklim değişikliği; insan kaynaklı veya insan kaynaklı olmayan etmenlerden dolayı iklimde meydana gelen zamansız değişimler olarak tanımlanmaktadır (Oa, 2018). İklim değişikliğinin temelinde insanoğlunun kurmuş olduğu yaşam düzeni, sanayileşme ve atıkların doğayı kirletmesi, ozon tabakasının değişimi ile güneş ışınlarının meydana getirdiği süreçler yatmaktadır. Bu süreçler mikroorganizmalar dahil bütün canlıları etkilemektedir (İdil ve ark. 2013, Sevgi ve Leblebici 2022). İklim değişikliği, özellikle aşırı hava olaylarının (sıcak hava dalgaları, kuraklık, seller, tropikal fırtınalar vb.) daha sık ve şiddetli hale gelmesiyle birlikte, doğa ve insan yaşamı üzerinde önemli ve kalıcı etkiler yaratmıştır. Bu etkiler, artık doğal değişkenliğin ötesine geçerek, ekosistemlerde, tarımda, yerleşim yerlerinde ve insan sağlığında doğrudan ve dolaylı kayıplara neden olmaktadır. İklim

değişikliği, günümüzde sadece çevresel bir tehdit olmanın ötesinde, gıda sistemlerinden su kaynaklarına, ekosistemlerden insan sağlığına kadar çok sayıda sektörü doğrudan etkileyen küresel bir kriz haline gelmiştir.

Gözlemler, birçok ekosistemde yapı ve işleyişin bozulduğunu, türlerin dağılımında kutuplara ve yüksek rakımlara doğru kaymalar yaşandığını, bazı türlerin ise yerel ya da küresel düzeyde yok olduğunu göstermektedir. Mercan resifleri, ormanlar ve denizel yaşam bu değişimlerden ağır şekilde etkilenmiştir.

Çizelge 2. İklim Değişikliğinin Doğa ve İnsan Sistemlerine Etkileri

Etki Alanı	Gözlenen Etkiler	Güven Düzeyi
Ekosistemler	Tür kayıpları, kutuplara ve yüksek rakımlara göç, kitlesel ölümler, yosun ormanlarının yok oluşu	Yüksek – Çok yüksek
Okyanuslar	Mercan ağarması ve ölümü, asitlenme, balıkçılık ve kabuklu deniz ürünlerinde azalma	Yüksek
Tarımsal üretim	Verim artışının yavaşlaması, düşük ve orta enlemlerde verim kaybı	Orta – Yüksek
Gıda güvenliği	Gıda üretiminde ani kayıplar, erişim sorunu, beslenme çeşitliliğinde azalma, yetersiz beslenme	Yüksek
Su güvenliği	Yılın bazı dönemlerinde ciddi su kıtlığı yaşayan nüfus: dünya nüfusunun %50'si	Orta
İnsan sağlığı	Sıcak hava dalgalarına bağlı ölümler, yetersiz beslenme, hassas gruplarda sağlık risklerinde artış	Orta – Yüksek
Yerleşim ve altyapı	Sel ve fırtına kaynaklı zararlar, kıyı alanlarında risk artışı	Orta
Geri döndürülemez etkiler	Tür yok oluşları, buzulların erimesi, permafrost çözülmesi, ekosistem çöküşü	Orta – Yüksek

(IPCC, 2022)

Gıda ve su güvenliği de ciddi şekilde zedelenmiştir. Tarımsal üretimdeki büyüme yavaşlamış; okyanus asitlenmesi ve ısınması, balıkçılık ve deniz ürünleri üretimini azaltmıştır. Gıda üretimi ve erişimindeki düşüş ile beslenme çeşitliliğindeki azalma, yetersiz beslenme oranlarını artırmıştır. Bu etkiler

özellikle yerli halklar, küçük üreticiler, düşük gelirli gruplar ve hassas bireylerde (çocuklar, yaşlılar, hamileler) daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca dünya nüfusunun yarısı, yılın en az bir bölümünde ciddi su kıtlığı yaşamaktadır. Bazı etkiler (örneğin, buzul erimesi, tür kayıpları, donmuş toprak çözülmesi) geri döndürülemez düzeye ulaşmakta veya bu sınıra yaklaşmaktadır (IPCC 2022).

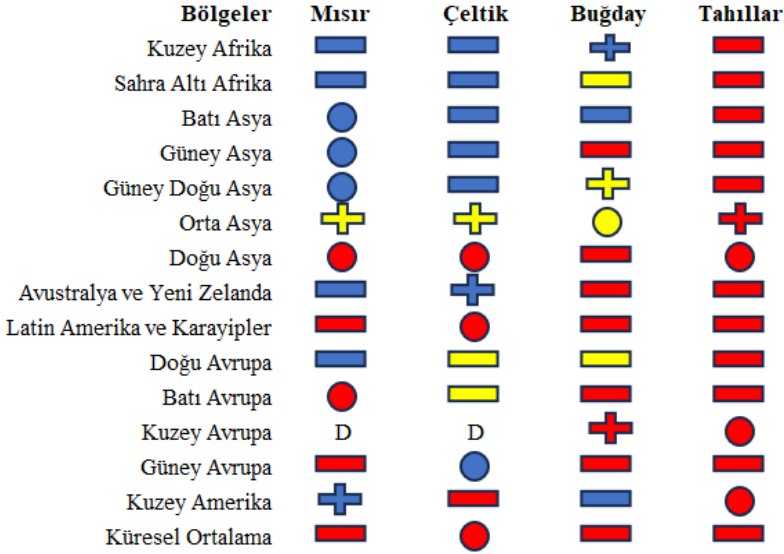
3. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TAHILLAR ÜZERİNE ETKİSİ

Tarım ve iklim değişikliği, farklı şekillerde birbirleriyle bağlantılıdır çünkü iklim değişikliği, tarımsal üretim üzerinde olumsuz etkilere sahip biyotik ve abiyotik streslerin ana nedenidir (Raza vd., 2019). İklim değişikliği, yıllık yağıştaki farklılıklar; ortalama sıcaklık; sıcak hava dalgaları; CO₂ ve ozon konsantrasyonu; yabancı otlardaki değişiklikler; zararlılar veya mikroplar; rüzgar bileşimi; ve heyelanlar, seller ve kuraklık gibi doğal afetlerin meydana gelmesi gibi çeşitli şekillerde küresel arazi alanını ve tarımsal üretimini etkiler ve dünyadaki gıda güvenliğini kötüleştirir (Bagale, 2021; Neupane vd., 2022).

İklim modelleri (İM'ler), iklim değişkenliğinin artmasıyla su kaynaklarının tükenmesi, sık yaşanan kuraklık olayları, sera gazı emisyonlarına bağlı ortalama küresel sıcaklık artışı ve 21. yüzyılda su talebi açığının beş kat artmasının tarımsal verimlilik üzerinde önemli derecede olumsuz etkiler yaratacağını öngörmektedir; bu durum küresel gıda güvenliği için ciddi bir tehdittir (Nauman vd., 2018; Neupane vd., 2021). Ayrıca, İM'ler, sürdürülebilir uyum önlemleri hayata geçirilmediği takdirde, sıcaklıkların yükselmesi ve yağışların azalması veya mevsimsel olarak yeniden dağılımının mısır verimini 21. yüzyılın ortalarına ve sonlarına doğru düşüreceğini belirtmektedir (Neupane vd., 2022).

İklim değişikliğinin tahıllar üzerindeki etkileri dünyanın farklı bölgelerinde farklı şekillerde gözlemlenmektedir. IPCC (2022) raporuna göre iklim değişikliği Orta Asya'da tahıllar üzerine olumlu bir etki gösterirken, Kuzey ve Sahra altı Afrika, Asya'nın diğer bölgeleri ve Doğu ve Batı Avrupa'da ise olumsuz etki göstermesi beklenmektedir. Kuzey Afrika'da meydana gelen iklim değişiklikleri mısır üretimi üzerine orta düzeyde olumlu etki gösterirken, çeltik ve buğday üzerine ise orta derecede olumsuz etki göstermesi beklenmektedir. Bunun yanı sıra Avustralya ve Yeni Zelanda'da ise çeltik

üzerine orta düzeyde olumlu etki, Kuzey Avrupa’da ise buğday üzerine yüksek olumlu etki göstermesi beklenmektedir (IPCC 2022, Şekil 1).



Şekil 1. İklim değişikliğinin farklı bölgelerde tahıllar üzerine etkileri. Eksi işaretler negatif, artı işaretler pozitif, daireler ise karışık etkiyi, sarı renk; düşük derecede, mavi renk orta derecede, kırmızı renk ise yüksek derecede etkiyi belirtmektedir (IPCC, 2022).

Gıda güvenliği, iklim değişikliğinin tahıl verimi üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri nedeniyle önemli ölçüde tehdit altında bulunmaktadır. Buğday, mısır ve pirinç, küresel gıda arzına en büyük katkıyı sağlayan temel tahıllardır. İklim değişikliğinin tahıl verimi üzerindeki etkileri çeşitli modeller ve yöntemler aracılığıyla değerlendirilmiştir. İklim değişikliğinin gelecekteki buğday, pirinç ve mısır üretimi üzerindeki küresel etkileri incelendiği bir çalışmada, iklim değişikliğinin daha soğuk iklim bölgelerinde buğday ve mısır veriminde artışlara yol açabileceğini, buna karşın ekvatorial kuşaktaki ülkelerde bu mahsullerin verimlerinde azalma yaşanabileceğini göstermektedir. Atmosferdeki karbondioksit (CO₂) konsantrasyonundaki yükseliş, özellikle daha soğuk bölgelerde karbon alımını artırarak buğday ve mısır üretimine olumlu katkı sağlayabilir. Öte yandan, pirinç verimi, iklim değişikliğinin yol açtığı su kıtlığı nedeniyle, başta büyük pirinç üreticisi ülkeler olmak üzere genel

olarak azalması beklenmektedir (Farooq vd., 2022). Bazı araştırmacılar ise gece sıcaklıklarının artması, serin iklimlerin daha sıcak hale gelmesiyle 2050 ve 2080'lerde çeltik bitkisinde %2.9 ile %34 arasında bir verim artışı olabileceğini belirtmişlerdir (Piao vd., 2010; Lobel vd., 2011).

Afrika'da mısır, sorgum, darı ve buğday kullanılarak yapılan bir çalışmada yağmurla beslenen alanlarda yapılan çalışmada Güney Afrika'da iklim değişikliğinin 2050 yılına kadar tahıl verimini %6 azaltabileceği belirtilmiş ve adaptasyon kabiliyeti yüksek çeşitlerin iklim değişikliğinin etkilerini azaltacağı belirlenmiştir (Alimaghani vd., 2024).

Farklı iklim değişikliği senaryoları altında gelecekteki iklim değişikliklerinin Afganistan'da buğday arpa ve pirinç üzerine etkilerinin incelendiği RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre, 2021-2050 döneminde buğday veriminde önemli bir azalma olacağı, Orta ve yüksek emisyon senaryolarına göre ortalama buğday verimindeki azalmanın sırasıyla 2050 yılına kadar %20.90 veya %28.11 olabileceği belirtilmiştir. Pirinç için, 2021-2050 döneminde verimde marjinal bir azalma olabileceği, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre, ortalama verimdeki azalmanın 2050 sonunda sırasıyla %4.92 veya %6.10 olması öngörülmüştür. Regresyon modelinden elde edilen parametre tahminleri, arpa veriminin orta emisyon senaryosunda %24 (387 kg/ha) ve yüksek emisyon senaryosunda %34 (535 kg/ha) azalmasının beklendiğini göstermiştir (Sarwary vd., 2023).

İklim değişikliğinin farklı bölgelerde farklı etkilere sebep olduğu gibi; kışlık ve yazlık olarak ekilen tahıllarda da farklı etkiler gösterebileceği düşünülmektedir. Sibiry'a gibi tahılların kışlık ve yazlık olarak ekildiği, yüksek enlem bölgelerinde iklim değişikliğinin olumlu etkilerinin görülebileceği düşünülmektedir. Kışlık mahsullerin (çavdar ve kışlık buğday) veriminin kısa vadede (2025-2030) ve orta vadede (2045-2050) %17 oranında azalması öngörülmekteyken, aynı zamanda, ilkbaharda yetiştirilen tahılların (yulaf, arpa, yazlık buğday) veriminin kısa vadede %12, orta vadede ise %10 oranında artması beklenmektedir (Gancharov vd., 2022).

İklim değişikliği yağış miktarında ve dağılımında değişikliklere neden olarak su kaynakları ve dinamikleri üzerinde olumsuz bir etkiye yol açmıştır (Saylak 2022). Ancak, su talebi artarken, su kaynakları da iklim değişikliği nedeniyle azalmaktadır. İklim değişikliğinin neden olduğu yüksek sıcaklıklar, yoğun ışık ve kuru rüzgar yalnızca su kaynaklarını sınırlamakla kalmamış, aynı

zamanda kuraklığa da yol açmıştır (Çiftçi vd., 2025). Mevsim normallerinin değişmesi ve yetersiz yağışların yanı sıra yüksek buharlaşmalar yoluyla toprak tuzluluğunda da artış görülmektedir. Bu bölgelerdeki yer altı su seviyesi ve tuzluluk kontrolü büyük ölçüde su dengesinin iyi düzenlenmesine bağlıdır. Sezer vd. (2021) yeraltı suyu tuzluluk seviyelerinin artmasıyla buğdayda hektolitre ağırlığı, yağ oranı, nişasta oranı ve NDF değerlerinin azaldığını, protein oranı, sedimentasyon değeri, yaş glüten içeriği, kül oranı ve ADF değerleri ise arttığını bildirmiştir.

İklim değişikliğinin tahılların verimini etkileyebileceği gibi tahılların kalitesi üzerine de etkisinin olabileceği bilinmektedir. Tahıl kalitesi gece ve gündüz sıcaklıklarından, yağışlardan ve havadaki karbondioksit oranından etkilenmektedir. Kaplan vd. (2019) sıcaklığın mısır veriminin yanı sıra nişasta kalitesini etkileyen önemli bir çevresel faktör olduğunu belirtmiş ve ısı stresinin sadece mısır tanesi verimini düşürmekle beraber aynı zamanda mısır nişastasını kalitesini de değiştireceğini belirtmiştir. Mevcut bilimsel çalışmalar artan CO₂ oranlarının tanelere karbonhidrat taşınımını artırabileceği ve nişasta oranlarında artış gösterebileceğini belirtirken, protein oranlarında ise düşüşe sebep olabileceği bildirilmiştir. Artan sıcaklık ve kuraklığın nişasta oranını azaltırken, protein oranında nişasta azalmasına paralel olarak artış olabileceği belirtilmiştir (Thitisaksakul vd., 2012; Ben Mariem vd., 2021). Yine atmosferdeki CO₂ artışının C3 fotosentezi yapan tahıl tanelerinde makro ve mikro besin elementlerini azaltabileceği Zn, Fe, S, Ca, Mg, P, Mn, K ve Mo gibi besin elementlerinin azaldığı, Na ise CO₂ varlığında önemli ölçüde artış olduğu belirlenmiştir (Ben Mariem vd., 2021).

4. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ İLE MÜCADELE VE TAHİL VERİMİNİ ARTIRMA STRATEJİLERİ

Küresel iklim değişikliğiyle mücadele etmek ve sürekli artan insan nüfusu için yeterli gıda (besin) ve enerji gereksinimlerini sağlamak son yıllardaki en büyük zorluklardır (Hunter vd., 2019; Hendre vd., 2019, Neupane vd., 2021). İklim değişikliğine uyum sağlarken gıda üretiminin artırılması ve çevresel açıdan sürdürülebilir sistemlerin oluşturulması gerekliliğini ortaya çıkmaktadır (Acar vd., 2018). Dolayısıyla geleneksel ıslah tekniklerini kullanarak iklim koşullarına dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi, moleküler ve

genomik teknikleri kullanılarak aşırı iklim değişikliği senaryoları altında verim ve kalitesini koruyabilen tahılların geliştirilmesi gerekmektedir.

Tahıl üretimini korurken iklim değişikliğiyle mücadele etmenin bir diğer yaklaşımı, sulama ve gübre kullanım verimliliğinin iyileştirilmesi de dahil olmak üzere agronomik en iyi yönetim uygulamalarının uygulanması olacaktır. İklim değişikliği ve hızlı nüfus artışı nedeniyle, tatlı su kaynakları küresel olarak azalmaktadır. Dünyanın hızla artan nüfusunun gıda sıkıntısı ve su krizlerine yol açması öngörülmektedir. Sonuç olarak, büyüyen nüfusun taleplerini karşılamak için ya daha fazla tarım arazisi tarıma tahsis edilmeli ya da birim alan başına çıktıyı en üst düzeye çıkaran tarım yöntemleri benimsenmelidir. Tarım alanını genişletmek bir seçenek olmadığından, çalışmalar birimin verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya yoğunlaşmalıdır (Karaer vd., 2024).

Yapılan farklı çalışmalarda iklim değişikliğine karşı tahıl üretimini ve gıda talebini karşılamak için farklı öneriler sunulmuştur. Wang vd. (2018) diğer tahıllara kıyasla daha az gübreleme ve daha az su kullanarak yetişen darıların daha az sera gazı yaydığını ve iklim değişikliğinde iyi bir potansiyele sahip olduğunu belirtirken, Ben Mariem vd., (2021), strese adapte olmuş çeşitlerin geliştirilmesi yoluyla ürün verimini artırmanın hayati önem taşıdığını vurgulamaktadır. Mevcut ıslah programları ve tarımsal teşvikler neredeyse yalnızca verime dayalı olsada, tahıl kalitesinin iyileştirilmesi için ıslah, insanlığın beslenme durumunu anlamlı bir şekilde iyileştirebileceğini bildirmiştir. Başaran vd. (2019) ise tuzluluğa, kuraklığa ve diğer çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklı olan bitkilerin iklim değişikliğinin mevcut eğilimleri altında tarımsal sürdürülebilirliği ve gıda güvenliğini sağlamanın etkili yolları arasında olduğunu bildirmiştir.

Yerel ırklar genetik çalışmalar için önemli bir kaynaktır. Örneğin, binlerce yıldır farklı çevre koşulları altında yetiştirilen ve gen bankalarında saklanan buğday yerel çeşitleri, daha geniş bir genetik çeşitlilik sunar ve çeşitli çevresel stres koşullarına uyum sağlayabilen çeşitleri içerdiğinden stres adaptasyonu için bir temel sağlar (Lopes vd., 2015). Gliserol-3-fosfat asiltransferazın bitkilerin ısı direncini iyileştirmede önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir (Yan vd., 2008), moleküler ıslah yoluyla tahıllarda (örneğin buğday, mısır, çeltik) gliserol-3-fosfat asiltransferaz ile ilgili enzimlerin daha

yüksek seviyelerde aşırı ekspresyonunu elde etmek de mümkündür ve bu muhtemelen ısı toleransını artırabileceği belirtilmiştir (Wang vd., 2018).

Bitkilerin stres koşullarına karşı geliştirdiği fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler tepkilerin moleküler teknikler ve genomik yaklaşımlar aracılığıyla anlaşılması, stres toleranslı çeşitlerin geliştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunabilir (Bozca ve Leblebici, 2022). Genomikteki gelişmeler sayesinde pirinç, buğday ve mısır gibi tahıllarda aroma, pişme kalitesi, ekmek hacmi, sertlik ve değirmen verimi gibi kalite özellikleriyle ilişkili genler tanımlanmıştır (Henry 2021). GWAS ve genomik tahmin yöntemleri verim ve stres toleransı gibi agronomik özelliklerin belirlenmesinde etkili olmuştur (Varsney vd., 2017; Pham vd., 2019 Srivastava vd., 2020). Genomik seleksiyon ve CRISPR/Cas9 gibi gen düzenleme teknolojileri, yabancı akrabalardan yararlanarak (örneğin *Hordeum spontaneum*, teosinte) kuraklık gibi stres faktörlerine dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesini olanak sağlamaktadır (Choudhary vd., 2017).

Küresel iklim değişikliğinin etkilerini azaltmanın diğer etkili yöntemleri agronomik yöntemlerdir. Sulama ve gübrelemenin yönetiminin iyi yapılmasıdır. Sulama ve gübrelemenin en etkili şekilde yapılmasıyla tahıl verimi korunur ve tarımın çevreye olan etkisi azaltılabilir ve su kaynakları korunabilir (Çiftçi vd., 2025; Ahi vd., 2022). Ayrıca iyi bir ekim nöbeti sistemi uygulanarak tahılların verim ve kaliteleri artırabilmektedir. Ayrıca bölgeye adapte olmuş çeşitlerin kullanımı, yerel çeşitlerin özelliklerinin belirlenip ıslah programlarına dahil edilmesiyle tahılların verim ve kaliteleri artırılabilir (Mut vd., 2024). Değişen iklim koşulları beraberinde ekim sistemlerini, zamanlarını ve ürünlerdeki farklılığı getirebilir. Bölgelere uygun tür ve çeşitlerin belirlenmesi, bölgelerde tahıl türleri için en uygun ekim zamanlarının belirlenmesiyle iklim değişikliğinin etkileri azaltılabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ

İklim değişikliği beraberinde tahılların üretimini ve gıda krizini riske atmaktadır. Artan dünya nüfusu ve gıda talebinin karşılanabilmesi için iklim değişikliğinde tahılların veriminin ve kalitesinin korunması oldukça önemlidir. Yapılan bilimsel çalışmalar tahıl üretiminin dünya genelinde farklı bölgelerde farklı şekillerde etkileneceğini göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı tahıllar üzerinde stres faktörlerini azaltacak, kuraklık ve hastalıklara dayanıklı bölgelere adapte olmuş çeşitlerin belirlenmesi, genetik kaynakların korunması

ve tarım sistemlerinin ekosisteme zarar vermeyecek şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Ayrıca iklim değişikliğiyle beraber bazı bölgelerin tahıl desenlerinde de değişiklik olabilir. Gıda krizinin yaşanmaması ve tahıl üretiminin azalmaması için farklı bölgelere uyum sağlayacak kaliteli tahıl türlerinin (sıcak ve soğuk iklim tahıllarının) belirlenmesi ve çiftçilerin de bu tahılların yetiştiriciliği ile ilgili bilgilendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Acar, Z., Can, M., Aşçı, Ö. Ö., Gülümser, E., Kaymak, G., & Ayan, İ. (2018). Sera Gazı Salınımı ve Çevre Kirliliğinin Azaltılması Yönünden Yemlik Baklagillerin Önemi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(3), 313-317.
- Ahi, Y., Coşkun Dilcan, Ç., Köksal, D. D., & Gültaş, H. T. (2023). Reservoir evaporation forecasting based on climate change scenarios using artificial neural network model. *Water Resources Management*, 37(6), 2607-2624.
- Alimaghani, S., van Loon, M. P., Ramirez-Villegas, J., Adjei-Nsiah, S., Baijukya, F., Bala, A., ... & van Ittersum, M. K. (2024). Climate change impact and adaptation of rainfed cereal crops in sub-Saharan Africa. *European Journal of Agronomy*, 155, 127137.
- Bagale, S. (2021). Climate ready crops for drought stress: A review in Nepalese context. *Reviews in Food and Agriculture (RFNA)*, 2(2), 83-87.
- Başaran, U., Doğrusöz, M. Ç., Gülümser, E., & Mut, H. (2019). Using smoke solutions in grass pea (*Lathyrus sativus* L.) to improve germination and seedling growth and reduce toxic compound ODAP. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 43(6), 518-526.
- Ben Mariem, S., Soba, D., Zhou, B., Loladze, I., Morales, F., & Aranjuelo, I. (2021). Climate change, crop yields, and grain quality of C3 cereals: A meta-analysis of [CO₂], temperature, and drought effects. *Plants*, 10(6), 1052.
- Bozca, F. D., Leblebici, S. (2022) Interactive effect of boric acid and temperature stress on phenological characteristics and antioxidant system in *Helianthus annuus* L. *South African Journal of Botany* 147, 391-399
- Chadalavada, K., Kumari, B. R., & Kumar, T. S. (2021). Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. *Planta*, 253(5), 113.
- Choudhary, M., Singh, V., Muthusamy, V., & Wani, S. H. (2017). Harnessing crop wild relatives for crop improvement. 6(2), 73-85.

- Ciftci, B., Varol, I. S., Akcura, S., Kardes, Y. M., Karaman, S., & Kaplan, M. (2025). Morphological and nutritional responses of sorghum to variable irrigation levels and nitrogen doses. *PLoS One*, 20(5), e0323901.
- Elliott, J., Deryng, D., Müller, C., Frieler, K., Konzmann, M., Gerten, D., ... & Wisser, D. (2014). Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3239-3244.
- FAOSTAT (2023). Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, Son erişim tarihi: 29.06.2025.
- Farooq, A., Farooq, N., Akbar, H., Hassan, Z. U., & Gheewala, S. H. (2023). A critical review of climate change impact at a global scale on cereal crop production. *Agronomy*, 13(1), 162.
- Geçit, H., Çiftçi, C., Emeklier, H., İncikarakaya, S., Adak, M., Kolsarıcı, Ö., ... & Kendir, H. (2009). Tarla Bitkileri AÜ Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327(5967), 812-818.
- Goncharov, A. A., Safonov, T. A., Malko, A. M., Bocharov, G. A., & Goncharov, S. V. (2023). Climate change expected to increase yield of spring cereals and reduce yield of winter cereals in the Western Siberian grain belt. *Field Crops Research*, 302, 109038.
- Hendre, P. S., Muthemba, S., Kariba, R., Muchugi, A., Fu, Y., Chang, Y., ... & Jamnadass, R. (2019). African Orphan Crops Consortium (AOCC): status of developing genomic resources for African orphan crops. *Planta*, 250, 989-1003.
- Henry, R. J. (2021). Genomics of grain quality in cereals. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 21(spe), e379821S1.
- Hunter, D., Borelli, T., Beltrame, D. M., Oliveira, C. N., Coradin, L., Wasike, V. W., ... & Tartanac, F. (2019). The potential of neglected and underutilized species for improving diets and nutrition. *Planta*, 250, 709-729.
- IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panel)i. (2022). *İklim değişikliği 2022: Etkiler, uyum ve kırılganlık. IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu*,

- Çalışma Grubu II katkısı* (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, vd. [Ed.]). Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Idil, Ö., Darcan, C., Ozen, T., & Ozkanca, R. (2013). The effect of UV-A and various visible light wavelengths radiations on expression level of *Escherichia coli* oxidative enzymes in seawater. *Jundishapur Journal of Microbiology* 6 (321), 226-232.
- Kaplan, M., Karaman, K., Kardes, Y. M., & Kale, H. (2019). Phytic acid content and starch properties of maize (*Zea mays* L.): Effects of irrigation process and nitrogen fertilizer. *Food chemistry*, 283, 375-380.
- Karaer, M., Kardeş, Y. M., Gülümser, E., Mut, H., & Gültaş, H. T. (2024). The Effect Of Different Irrigation Level And Nitrogen Doses On The Silage Yield And Quality Of Sorghum× Sudan Grass Hybrid (*Sorghum bicolor* L.× *Sorghum sudanese*). *Turkish Journal Of Field Crops*, 29(2), 251-259.
- Kardeş, Y. M., Erbaş Köse, Ö. D., & Mut, Z. (2019). Yıllar İtibariyle Tahıl ve Yemeklik Tane Baklagillerin Türkiye'deki Durumu, Bilecik Tarımındaki Yeri. Hasat Kongre, Ankara.
- Liu, R.H. (2004). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: *Mechanism of action*, *J. Nutrition*, 134: 3479–3485
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620.
- Lopes, M. S., El-Basyoni, I., Baenziger, P. S., Singh, S., Royo, C., Ozbek, K., ... & Vikram, P. (2015). Exploiting genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *Journal of experimental botany*, 66(12), 3477-3486.
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., ... & Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 45(7), 3285-3296.
- Neupane, D., Adhikari, P., Bhattarai, D., Rana, B., Ahmed, Z., Sharma, U., & Adhikari, D. (2022). Does climate change affect the yield of the top three cereals and food security in the world?. *Earth*, 3(1), 45-71.
- Neupane, D., Mayer, J. A., Niechayev, N. A., Bishop, C. D., & Cushman, J. C. (2021). Five-year field trial of the biomass productivity and water input

- response of cactus pear (*Opuntia* spp.) as a bioenergy feedstock for arid lands. *GCB Bioenergy*, 13(4), 719-741.
- Oa, O. (2018). Climate change and its effect on the global economy and security: A call for more robust climate finance, prevention of climate finance against corrupt spending and review of articles 9 (1),(3) & (4) of the Paris Agreement and 12 (8) of Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *Environment Pollution and Climate Change*, 2(03).
- Okarter, N., Liu, C. S., Sorrells, M. E. and Liu, R. H. (2010). Phytochemical content and antioxidant activity of six diverse varieties of whole wheat. *Food chemistry*, 119(1): 249-257.
- Pal, M., & Molnár, J. (2021). Growing importance of cereals in nutrition and healthy life. *International Journal of Food Science and Agriculture*, 5(2), 275-277
- Pham, A. T., Maurer, A., Pillen, K., Brien, C., Dowling, K., Berger, B., ... & March, T. J. (2019). Genome-wide association of barley plant growth under drought stress using a nested association mapping population. *BMC plant biology*, 19, 1-16.
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., ... & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51.
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PloS one*, 8(6), e66428.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 34.
- Sarwary, M., Samiappan, S., Khan, G. D., & Moahid, M. (2023). Climate change and cereal crops productivity in Afghanistan: evidence based on panel regression model. *Sustainability*, 15(14), 10963.
- Saylak, S. (2022). Characaterization of salt and drought tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.). Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska In Partial Fulfillment of Requirements, For the Degree of Master of Science.

- Sevgi, K., Leblebici, S. (2022) Bitkilerde ağır metal stresine verilen fizyolojik ve moleküler yanıtlar. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences* 7 (4), 528-536
- Sezer, İ., Akay, H., Mut, Z., Arslan, H., Öztürk, E., Erbaş Köse, Ö. D., & Kiremit, M. S. (2021). Effects of different water table depth and salinity levels on quality traits of bread wheat. *Agriculture*, 11(10), 969.
- Shavanov, M. V. (2021). The role of food crops within the Poaceae and Fabaceae families as nutritional plants. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 624, No. 1, p. 012111). IOP Publishing.
- Srivastava, R. K., Singh, R. B., Pujarula, V. L., Bollam, S., Pusuluri, M., Chellapilla, T. S., ... & Gupta, R. (2020). Genome-wide association studies and genomic selection in pearl millet: Advances and prospects. *Frontiers in Genetics*, 10, 1389.
- Tarariko, O. H., Iliencko, T. V., Kuchma, T. L., & Velychko, V. A. (2022). Dynamics of climate changes and its effect on the performance of cereals according to satellite data. *Agricultural science and practice*, (2), 64-80.
- Thitisaksakul, M., Jiménez, R. C., Arias, M. C., & Beckles, D. M. (2012). Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition. *Journal of cereal science*, 56(1), 67-80.
- Varshney, R. K., Shi, C., Thudi, M., Mariac, C., Wallace, J., Qi, P., ... & Xu, X. (2017). Pearl millet genome sequence provides a resource to improve agronomic traits in arid environments. *Nature biotechnology*, 35(10), 969-976.
- Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V., & Raghavan, V. (2018). Effect of climate change on the yield of cereal crops: A review. *Climate*, 6(2), 41.
- Yan, K., Chen, N., Qu, Y. Y., Dong, X. C., Meng, Q. W., & Zhao, S. J. (2008). Overexpression of sweet pepper glycerol-3-phosphate acyltransferase gene enhanced thermotolerance of photosynthetic apparatus in transgenic tobacco. *Journal of Integrative Plant Biology*, 50(5), 613-621.

BÖLÜM 8

KARBON YUTAĞI OLARAK MERALAR

Doç. Dr. Erdem GÜLÜMSER^{1*}

Prof. Dr. Uğur BAŞARAN²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16370471>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik, Türkiye. erdem.gulumser@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar), Orcid ID: 0000-0001-6291-3831

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Ziraat Fakültesi, Yozgat, Türkiye. ugur.basaran@yobu.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-6644-5892

1. GİRİŞ

Karbon tutulumu (sekestrasyon), atmosferden toprağa karbondioksit (CO_2) aktarma sürecini ifade eder. Bu şekilde karbondioksiti atmosferden çekerek depolayan doğal veya insan yapımı sistemlere ise karbon yutağı denilmektedir.

Karasal ekosistemler, atmosferdeki karbondioksitin azaltılmasında önemli rol oynayan doğal karbon yutakları olarak işlev görmektedir. Bu bağlamda, ormanların ardından en büyük karbon depolama potansiyeline sahip alanlardan biri olarak meralar ön plana çıkmaktadır. Özellikle iyi yönetilen meralar, hem bitki biyokütlesinde hem de toprak organik maddesinde önemli miktarda karbon depolayabilmektedir (Conant ve ark., 2001). Diğer taraftan meralarda belirli bir miktarda CO_2 , otlayan hayvanlardan metan (CH_4) ve topraklardan nitroz oksit (N_2O) salınımı da gerçekleşmektedir.

Meralarda karbon birikimi yalnızca yüzeysel toprak katmanlarında değil, derin profillerde de gerçekleşmektedir. Özellikle çok yıllık bitkilerin kök sistemleri sayesinde meralardaki karbon havuzlarının %90'ı toprakta bulunur (Schuman ve ark., 2001). Toprakta depolanan C bitki biyokütlesinde tutulan C'den daha kararlı olduğundan, meralar, karbonun atmosferden uzaklaştırılması ve sera gazı emisyonlarının uzun vadeli azaltılması için stratejik doğal alanlardır (Silveira ve ark., 2022).

Birçok çalışma, meraların topraklarında yıllık olarak hektar başına 0.2 ile 2 ton karbon arasında değişen oranlarda karbon biriktirebildiğini ortaya koymuştur (Soussana ve ark., 2010). Bu oran, mera ekosisteminin tipi, toprak özellikleri, yağış rejimi ve özellikle otlatma baskısı gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Örneğin, hafif ve orta düzeyde yapılan kontrollü otlatmanın, bitki kök gelişimini ve toprak biyolojik aktivitesini teşvik ederek toprak karbon birikimini artırabileceği rapor edilmiştir (Derner ve Schuman, 2007). Buna karşın, aşırı otlatma veya meraların tarımsal üretim amacıyla dönüştürülmesi, toprak organik karbon düzeylerinde belirgin azalmaya yol açmakta ve bu alanları karbon kaynağı haline getirebilmektedir (Lal, 2004).

Uluslararası kuruluşlar da bu konuda dikkat çekici bulgular ortaya koymuştur. FAO (2020), sürdürülebilir mera yönetiminin, küresel karbon emisyonlarını azaltma stratejilerinin ayrılmaz bir parçası olduğunu belirtirken,

IPCC (2019)'de doğa temelli çözümler kapsamında meraların restorasyonu ve korunmasının iklim hedeflerine ulaşmada etkili olabileceğini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, karbon yutağı olarak meraların ekolojik ve iklimsel işlevlerini derinlemesine ele almayı, bu sistemlerin potansiyelini bilimsel veriler ışığında değerlendirmeyi ve sürdürülebilir mera yönetimi ile karbon tutma kapasitesi arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçlamaktadır. Böylece, hem akademik hem de uygulamaya yönelik yaklaşımlara katkı sunmak hedeflenmektedir.

2. MERALARIN EKOLOJİK ROLÜ

Meralar, yalnızca tarımsal üretim açısından değil, aynı zamanda küresel ekolojik sistemin bütünlüğü açısından da stratejik öneme sahip olan yarı-doğal ekosistemlerdir. Bitki örtüsü, toprak yapısı, biyolojik çeşitliliği ve işlevsel hizmetleri bakımından geniş bir yelpazede ekosistem hizmetleri sunmaktadır (White ve ark., 2000).

2.1. Karbon Dengeleme ve Karasal Karbon Döngüsü: Meralar, karasal ekosistemlerdeki karbon döngüsünün önemli bir parçasıdır. Fotosentez yoluyla atmosferdeki karbondioksiti bünyelerine alarak biokütlede (özellikle kök sisteminde) karbon depolarlar. Bu karbonun büyük bir kısmı, zamanla organik maddeye dönüşerek toprakta uzun süreli karbon birikimine katkı sağlar. FAO (2020), dünya genelindeki meraların yılda yaklaşık 0.3 ila 1.0 gigaton karbonu toprakta tutabildiğini belirtmektedir. Bu oran, ormanlar kadar olmasa da, tarım arazilerinden çok daha yüksektir.

2.2. Toprak Erozyonu ve Hidrolojik Stabilité: Meralarda bulunan yoğun ve sürekli bitki örtüsü, yüzey toprağını koruyarak hem rüzgâr hem de su erozyonunu azaltır. Toprak yüzeyini kaplayan çimsi bitkiler, özellikle eğimli arazilerde yüzey akışını yavaşlatır ve yağış sularının infiltrasyonunu artırır. Bu süreç, toprak nemini koruyarak mikroorganizma faaliyetlerini ve kök gelişimini destekler (Lal, 2004). Aynı zamanda, yeraltı su rezervlerinin beslenmesini kolaylaştırır.

2.3. Biyoçeşitlilik Koridorları ve Ekolojik Denge: Meralar, geniş biyotik etkileşim ağlarıyla birçok canlı türüne yaşam alanı sunar. Bitkiler, toprak organizmaları, böcekler, kuşlar ve memeliler arasında gelişen karşılıklı

ilişkiler, ekolojik dengenin sürdürülmesini sağlar. Özellikle bozkır ve step tipi meralar, nadir ve endemik türlerin barınma alanı olup, genetik çeşitliliğin korunmasında işlevseldir (Pärtel ve ark., 2005).

2.4. İklim Adaptasyonu ve Dayanıklılık: Meralar, yarı kurak ve kurak bölgelerde iklim değişikliğine karşı dayanıklı sistemlerdir. Bitki türlerinin büyük bir kısmı düşük yağış ve sıcaklık dalgalanmalarına adapte olmuştur. Bu nedenle meralar, kuraklık dönemlerinde bile toprak karbonunu koruyarak ekosistem hizmetlerinin devamlılığını sağlar. Arazi yönetimi stratejilerinin doğru uygulanması durumunda, bu ekosistemler iklim değişikliğinin etkilerini azaltıcı yönde kullanılabilir (Conant ve ark., 2001).

2.5. Sürdürülebilir Tarımsal Üretim ve Gıda Güvencesi: Meralar, düşük girdiyle yüksek verim alınabilen doğal yem alanlarıdır. Özellikle entegre tarım sistemlerinde mera otlatması, hayvancılığın karbon ayak izini azaltarak sürdürülebilirliği artırır. Bu sistemler aynı zamanda çiftçilerin ekonomik dayanıklılığını artırır, üretim maliyetlerini düşürür ve dışa bağımlılığı azaltır (FAO, 2019).

3. KARBON DEPOLAMA MEKANİZMASI

Meralar kapladıkları alan ve oluşturdıkları biyo-kütle nedeniyle büyük miktarda atmosferik CO₂'in tutulduğu önemli yutak alanlardır ve genel karbon döngüsünde de önemli rol oynarlar (Paudel ve ark., 2021). Dünya kara yüzeyinin %45'i (Antarktika hariç) otlak alanlardan oluşmaktadır (Reid ve ark., 2008). Meralar, küresel karbon döngüsünde çok önemli bir rol oynar ve karbon depolama mekanizması açısından oldukça etkili doğal sistemlerdir. Bu mekanizma, atmosferdeki karbondioksitin (CO₂) alınarak toprağa ve bitki biyokütlesine depolanması sürecini kapsar. Meraların karbon depolama mekanizması farklı yollar ile olmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

3.1. Fotosentezle Karbon Girişi: Mera bitkileri atmosferden CO₂ alarak fotosentez yapar ve bu karbonu bünyelerinde organik maddeye çevirir. Bitkiler büyüdükçe kökleri aracılığıyla toprağa karbon aktarırlar. Bitki gelişimini artıran uygun gübreleme ve otlatma yönetimi gibi uygulamaların genellikle toprakta daha fazla C tutulumuna neden olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte sıcaklık, yağış ve toprak özellikleri arasındaki karmaşık

etkileşimlere farklı sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilir (Conant ve ark., 2017). Bu konuda yapılan çalışmaların çoğunluğu (%68), uygun yönetimin toprak C stoklarını ortalama 1.4 Mg C/ha/yıl C birikim oranıyla artırdığını gösterirken diğerleri (%32) yönetimin toprak C üzerinde hiçbir etkisi olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte hiçbir çalışmada yönetimin toprak C üzerinde olumsuz etkilerine rastlanmamıştır (Silveira ve ark., 2024).

3.2. Kök Biyokütlesi ve Toprak Organik Karbonu (TOK):

Meralarda, özellikle çok yıllık bitkilerin kökleri toprakta uzun süre kalabilir. Ölen kökler ve bitki artıkları ayrışarak toprak organik karbon (TOK) birikimine katkı sağlar. Bu, karbonun uzun vadeli depolanması anlamına gelir. Otlak alanlarının kapladığı topraklarının dünya toprak C rezervlerinin yaklaşık %10-30'unu içerdiği (Eswaran ve ark., 1993) ve yaklaşık 0.2 Pg C/yıl bağladığı (Follett ve Schuman, 2005) tahmin edilmektedir. Amerika'da yayınlanan bir raporda otlatılan alanlarda en üst 10 cm'lik toprakta bulunan C'nun yalnızca %1'lik kısmının tüm ABD tarım arazilerinin toplam karbon salınımına (emisyon) eşdeğer olduğu bildirilmiştir (Silveira, 2012). Bu değer küresel CO₂ salınımının azaltılması açısından meraların önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Toprak organik karbonu ile organik madde seviyesi arasında belirli bir ilişki vardır. Organik madde yaklaşık % 60 karbondur, bu nedenle% 1 organik karbonlu topraklar yaklaşık% 1.7 organik madde içerecektir. Topraklar, okyanuslar ve kömür dikişleri gibi jeolojik lavabolardan sonra yeryüzündeki üçüncü büyük karbon deposudur. Nitekim topraklarda bulunan C atmosferden 2-4 kat, dünyadaki tüm bitki örtüsünden yaklaşık 4 kat daha fazladır var. Bu değerler, carbon depolama açısından topraklarında karbon tutulumunun artırılmasına yönelik yöntem ve stratejilerin orman alanları oluşturmak kadar hatta daha da önemli olabileceğini göstermektedir (Anonim, 2025).

3.3. Toprak Mikroorganizmaları: Organik madde, mikroorganizmalar tarafından parçalanarak toprağa karışır. Sağlıklı bir toprak mikrobiyomu karbonun stabilize edilmesinde önemli rol oynar.

Sağlıklı ve zengin bir toprak mikrobial varlığı için besin kaynağı gereklidir. Organik madde toprak mikroorganizmaları için yiyecek sağlayan en önemli kaynaktır. Toprak organik maddesi mikroorganizmaları, toprak yüzeyinde kalıntı ve ayrışan malzemeleri içerir. Toprak organik madde içeriği carbon tutmanın yanında, üretken meraları destekleyen sağlıklı topraklar için

kritiktir. Organik madde toprakları daha esnek ve besince zengin hale getirir, toprağın su tutma kapasitesini artırır ve torak zerrelere arasındaki bağı güçlendirir.

3.4. Hayvancılık ve Gübreleme: Kontrollü otlatma, toprağın yapısını iyileştirebilir ve karbon depolamayı artırabilir. Ancak aşırı otlatma, toprak erozyonuna ve karbon kaybına neden olur.

Tropikal ve ılıman iklim kuşaklarında yer alan doğal çayır ve mera alanları, küresel karbon döngüsünde belirleyici bir işlev üstlenmektedir. Ancak bu işlev, literatürde hâlâ yeterince açık ve kapsamlı bir şekilde ele alınmamıştır (Hall ve Scurlock, 1991; Hall ve ark., 1995). Mera ekosistemleri dünya genelinde homojen bir yapıya sahip değildir; aksine, oldukça çeşitli ekolojik ve coğrafi özellikler sergiler. Örneğin Afrika'nın savan ekosistemleri, Kuzey Amerika ve Avrasya'nın bozkırları, Avrupa'nın doğal çayırları ile Latin Amerika'daki otlak alanları ve tarım amacıyla oluşturulmuş yapay meralar, bu çeşitliliğin tipik örneklerini oluşturur. Özellikle tropikal bölgelerde, doğal çayır ve meraların yüzey alanı bakımından diğer bölgelere kıyasla çok daha geniş alanlara yayıldığı görülmektedir (örneğin, Sahra altı Afrika'da). Tablo 1'de karbon depolama kapasitesinin bölgelere göre farklılıkları verilmiştir. Tabloya göre en fazla karbon depolama kapasitesinin Kuzey Yarımküre'nin en uç noktasında bulunan arktik tundra olduğu görülmektedir. İliman bölgede ve tropik savanlarda ise bu değer daha düşük olmuştur.

Tablo 1. Bölgelere göre karbon depolama kapasiteleri*

Bölge Türü	Ortalama Toprak Karbon Depolama (Mg C/ha)
İliman çayırlar	50–150
Tropik savanlar	30–100
Arktik tundra	200+

*1 Mg = 1 metrik ton

Meralarda karbon depolama üzerine bazı faktörler etki etmektedir. Tablo 2'de bu faktörler ve etkileri verilmiştir. Yıllardır meraların üzerinde baskı oluşturan aşırı otlatma bu faktörlerin başında gelmektedir. Nitekim aşırı otlatma, bitkilerin sürekli zarar görmesine ve zayıflamasına, toprak erozyonuna, toprak mikroorganizmalarının yaşam alanlarını olumsuz etkilenmesine ve toprağın sıkışarak hava-su dengesinin bozulmasına neden

olur. Bu nedenle kontrollü otlatma yapılması gerekmektedir. Kontrollü otlatma, daha fazla bitki materyalinin ve organik madde anlamına gelmektedir. Bitki örtüsünün gelişmesini ve kök sisteminin güçlenmesi, bitkilerin daha fazla fotosentez yapmasına ve dolayısıyla da daha fazla karbonun atmosferden alınarak toprakta depolanmasına yol açar (Schimel ve ark., 1990; Thornley ve ark., 1991). Kısacası, meralar üzerinde derin kök yapısı, bitki tür ve çeşitliliği ve döngüsel otlatma karbon depolamayı pozitif yönde etkilerken, aşırı otlatma, yangın, erozyon gibi faktörler ise meralarda karbon depolama üzerinde negatif etki yaratmaktadır.

Tablo 2. Meralarda karbon depolamayı etkileyen faktörler

Faktör	Etkisi
Aşırı otlatma	Bitki örtüsünü azaltarak karbon kaybına yol açar
Organik madde artışı	Karbonun toprakta kalıcı olarak depolanmasını sağlar
Biy çeşitlilik	Farklı türlerin katkısı, karbon döngüsünü optimize eder
Tarıma dönüştürme	Depolanmış karbonun atmosfere geri salınmasına sebep olur

4. BİTKİSEL KARBON DEPOSU OLARAK MERALAR

Meralar, fotosentez yoluyla atmosferdeki karbon dioksiti (CO_2) bitkisel dokularda ve toprakta depolayarak önemli bir karbon yutağı görevi görür. Otlak alanlarında toprak C dengesi, fotosentez yoluyla tutulan C'nun miktarı ve solunum yoluyla oluşan C kayıplarına bağlıdır. Özellikle çok yıllık otların geniş kök sistemleri, karbonun büyük kısmını toprak altına taşıyarak uzun süreli depolanmasını sağlar. Bu süreçle oluşan toprak organik karbonu, karbonun toprakta yıllarca kalmasına olanak tanır.

Doğru yönetilen meralar, iklim değişikliğiyle mücadelede etkin rol oynayabilir; çünkü hem karbon salınımı azaltır hem de atmosferdeki karbonu bağlayarak sera gazı etkisini düşürür. Ancak aşırı otlatma ve toprak bozulması, meraların bu potansiyelini azaltır. Bu nedenle sürdürülebilir mera kullanımı, meraların bitkisel karbon deposu olarak korunmasında kritik öneme sahiptir.

4.1. Bitki Türleri ve Çeşitliliği: Meralarda yer alan bitki türlerinin çeşitliliği, bu alanların karbon depolama kapasitesini etkileyebilir. Çeşitli

bitkiler, farklı oranlarda karbon alımı ve depolaması yapabilirler. Örneğin, bazı bitkiler daha fazla biyokütle üretirken, diğerleri daha az karbon depolar.

4.2. Toprak Yapısı ve Organik Madde İçeriği: Toprağın verimliliği, organik madde içeriği ve yapısı, karbon depolama kapasitesini doğrudan etkiler. Toprağın derinliği, su tutma kapasitesi ve pH değeri gibi özellikler, karbonun ne kadar süreyle toprakta kalacağını belirler.

4.3. İklim Koşulları: İklim, mera ekosistemlerinin karbon depolama kapasitesinde önemli bir faktördür. Yağış, sıcaklık ve mevsimsel değişiklikler, bitkilerin büyümesini ve dolayısıyla karbon alımını etkileyebilir. Ayrıca, iklim değişikliği, meraların karbon depolama kapasitesini azaltabilir veya artırabilir.

4.4. Arazi Kullanım Uygulamaları: Mera alanlarında yapılan arazi kullanım uygulamaları (örneğin, otlatma, sulama, ekim vb.) da karbon depolama üzerinde etkili olabilir. Sürdürülebilir otlatma yönetimi ve diğer sürdürülebilir arazi kullanımı uygulamaları, karbon depolama kapasitesini artırabilirken, aşırı otlatma ve arazi bozulması bu kapasiteyi azaltabilir.

5. MERA YÖNETİMİ VE KARBON YUTMA KAPASİTESİ

Meraların karbon yutma kapasitesi, uygulanan yönetim yöntemlerine doğrudan bağlıdır. Doğru ve sürdürülebilir mera yönetimi, meralardaki bitki örtüsünü güçlendirerek fotosentez yoluyla karbon tutulmasını artırır. Özellikle rotasyonlu otlatma, aşırı otlatmanın önlenmesi, erozyon kontrolü ve toprak iyileştirme uygulamaları, meraların toprak organik karbon seviyesini yükseltir.

Buna karşılık, kötü yönetilen meralarda bitki örtüsü zayıflar, toprak bozulur ve karbon tutma kapasitesi düşer; hatta toprak karbon salımı başlayabilir. Bu nedenle etkili mera yönetimi, hem toprak sağlığını korumak hem de iklim değişikliğiyle mücadelede meraların rolünü artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Kısacası, iyi planlanmış mera yönetimi uygulamaları sayesinde meralar, sağlam bir karbon yutağı haline gelebilir ve doğal karbon döngüsünün dengelenmesine katkı sağlar.

Meraların karbon depolama kapasitesi, yönetim şekline bağlıdır. Bu yönetim koşulları olumsuz ve sürdürülebilir yönetim etkileri adı altında ikiye ayrılmaktadır.

5.1. Olumsuz Yönetim Etkileri: Mera alanları, doğru şekilde yönetildiğinde karbon yutağı (karbon sink) olarak işlev görebilir. Ancak olumsuz mera yönetimi, bu kapasitenin ciddi biçimde düşmesine ve hatta meraların karbon salan alanlara dönüşmesine yol açabilir. Meralarda aşırı otlatma, bitki örtüsünü zayıflatırken, toprak erozyonunu artırır. Toprak sıkışması, havalanmayı engeller ve karbonun toprakta tutulmasını azaltır.

5.2. Sürdürülebilir Yönetim Yaklaşımları: Mera alanları, dünya genelinde önemli karasal karbon yutakları arasında yer alır. Bitki örtüsü ve toprak aracılığıyla atmosferdeki karbonu bağlar ve uzun süreli karbon depolaması sağlar. Ancak bu kapasite, mera yönetimi uygulamalarına doğrudan bağlıdır. Sürdürülebilir mera yönetimi, sadece hayvancılığın verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir araçtır.

Sürdürülebilir mera yönetimi, meraların ekolojik, ekonomik ve sosyal işlevlerini uzun vadeli olarak korumayı ve geliştirmeyi amaçlayan uygulamalar bütünüdür. Sürdürülebilir mera yönetimi bazı faktörlere bağlıdır. Bu faktörler şu şekilde sıralanmaktadır;

Münavebeli otlatma: Hayvanların otlatma bölgeleri arasında döndürülmesi, bitki örtüsünün yenilenmesini sağlar.

Mera ıslahı: Karbon tutma kapasitesi yüksek bitki türlerinin desteklenmesi.

Organik gübre kullanımı: Toprak yapısını iyileştirerek karbon tutulumunu teşvik eder.

6. MERALARIN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ÜZERİNDEKİ ROLÜ

İklim değişikliği, dünya ekosistemlerinin yapısını ve işleyişini kökten etkileyen küresel bir çevre sorunudur. Bu bağlamda karbon döngüsündeki değişimlerin anlaşılması, özellikle kara ekosistemlerinin atmosferik karbondioksit (CO₂) ile etkileşimlerinin çözülmesini gerekli kılmaktadır. Ancak bu alandaki araştırmalar çoğunlukla orman ekosistemlerine odaklanmış; buna karşın, mera ve çayır alanlarının biyojeokimyasal döngüler içindeki rolü görece ihmal edilmiştir (Hall ve Scurlock, 1991).

Son yıllarda sıcaklık artışı, su rejimindeki değişimler ve azot gibi temel besin maddelerinin döngüsündeki bozulmaların, mera ekosistemleri üzerindeki etkileri daha net bir biçimde ortaya konmuştur. Bununla birlikte, uzun vadeli CO₂ gübrelemesi ve bu süreçlerin küresel karbon döngüsü ile olan karşılıklı ilişkileri ancak sınırlı sayıda çalışmada değerlendirilebilmiştir (Schimel ve ark., 1990; Thornley ve ark., 1991).

İklim değişikliği ile ilişkili olarak tüm dünyada Sıcaklık ve CO₂ seviyesinde bir artış öngörülmektedir. Genel olarak CO₂ seviyesindeki artış, fotosentezi ve su kullanım verimliliğini iyileştirerek verimliliği arttırabilir. Buna karşın ortalama sıcaklıktaki artış su stresini attırarak ve bazı hastalıkları teşvik ederek verimliliği düşürebilir (Fischer ve ark., 2002).

Sıcaklık ve CO₂ seviyelerindeki değişiklikler, türler arasındaki rekabeti dolayısıyla meraların kompozisyonunu etkileyecektir (Thornton ve ark., 2015). 30-35 °C'ye kadar sıcaklık artışları, tropical C4 türlerinin büyümesini ılıman C3 türlerinden daha fazla artırabilir (Howden ve ark., 2008). Yüksek CO₂'e C3 buğdaygil türlerinin C4 türlerinden daha iyi tepki verdiği kabul edilir (Reich ve ark., 2018) ve küresel olarak otların yaklaşık %57'si C3 bitkileridir (Osborne ve ark., 2014). Ortalama olarak, normal ekolojik koşullar ve ≈380 ppm atmosferik CO₂ konsantrasyonu esas alındığında, atmosferik CO₂ seviyesi 550 ppm olduğunda C3 bitkileri için %10-20, C4 bitkileri için %0-10 aralığında verimin artacağı beklenmektedir (Ainsworth ve Long, 2005).

Mera ekosistemleri sıklıkla durağan ve düşük karbon yutağı kapasitesine sahip sistemler olarak sınıflandırılrsa da, bu yaklaşım günümüz ekolojik gerçekliği ile çelişmektedir. Özellikle yarı kurak ve verimsiz olarak nitelendirilen meralardaki karbon tutulumundaki azalmalar, potansiyel karbon yutakları olarak değerlendirilebilecek nemli veya yarı nemli meraların restorasyonu ile dengelenebilir. Bu durum, farklı mera tiplerinin ve ekolojik özelliklerinin dikkate alındığı bölgesel ölçekli arazi kullanım kararlarının önemini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mera ekosistemleri, özellikle tropikal ve ılıman iklim kuşaklarında, küresel karbon döngüsünde kritik ancak uzun süre göz ardı edilmiş bir rol oynamaktadır. Fotosentez yoluyla atmosferden karbon alan ve bu karbonu biyokütle ile toprak organik maddesi şeklinde depolayan meralar, önemli doğal

karbon yutakları olarak değerlendirilmektedir. Bitki örtüsünün çeşitliliği, kök biyokütlesi, toprak yapısı ve yönetim uygulamaları, meralardaki karbon birikimini doğrudan etkilemektedir. Aşırı otlatma, arazi bozulumu ve iklimsel stres faktörleri, bu potansiyeli azaltırken; sürdürülebilir mera yönetimi, kontrollü otlatma ve toprak iyileştirme uygulamaları, karbon depolama kapasitesini artırabilir. Bu yönüyle meralar, yalnızca hayvancılığın temel girdisi olmakla kalmayıp, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadelede ekolojik bir araç olarak da değerlendirilmelidir.

İklim değişikliğinin meraları da etkilemesi kaçınılmazdır. İklim değişikliğinin en olumsuz yanı değişimin belirsizliği ve bölgesel farklılıklar içermesidir. Bu itibarla iklim değişikliği ile mücadele kapsamında küresel çözümlerin yanında yerel önlemlere ve yol haritalarına ihtiyaç duyulacaktır. Bunun için meraların korunması geliştirilmesi ve yönetimi alanlarında yeni yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Aksi halde mevcut yönetim ve kullanım şekliyle meraların geliştirilmesi ve C yutağı işlevlerini yerine getirmeleri her geçen gün daha da zor hale gelecektir.

Meralar, sahip oldukları geniş yüzey alanı ve toprakta organik madde biriktirme kapasiteleri sayesinde karbon yutakları arasında önemli bir konumdadır. Ancak bu potansiyelin etkin şekilde kullanılabilmesi, doğru arazi kullanım politikaları ve bilimsel temelli mera yönetim stratejileri ile mümkündür. Karbon emilimini artırmak için otlatma baskısının azaltılması, toprak verimliliğinin korunması ve bitki örtüsü çeşitliliğinin sürdürülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda meraların restorasyonu ve sürdürülebilir kullanımı, hem ekosistem hizmetlerinin devamlılığı hem de karbon salınımının sınırlandırılması açısından stratejik bir öncelik olarak ele alınmalıdır. Gelecek çalışmalar, mera türlerine ve bölgesel iklim koşullarına göre farklı karbon depolama potansiyellerini nicel olarak belirlemeye odaklanmalıdır. Bununla beraber alınacak bazı önlemler meraların korunmasına yardımcı olurken, daha fazla karbon depolama bakımından da fayda sağlayacaktır. Bunlar;

- Meraların korunmasına yönelik yasal ve politik düzenlemeler artırılmalıdır.
- Çiftçilere karbon yönetimi konusunda eğitim verilmelidir.
- Meraların karbon yutakları olarak işlevi, iklim politikalarına entegre edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165: 351–372.
- Anonim, 2025. <https://futurebeef.com.au/resources/soil-organic-matter-and-carbon-sequestration-in-pastures/> (Erişim: 19.06.2025).
- Conant, R.T., Paustian, K., & Elliott, E.T. (2001). Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11(2): 343-355.
- Conant, R. T., Cerri, C. E., Osborne, B. B., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2): 662-668.
- Derner, J. D., & Schuman, G. E. (2007). Carbon sequestration and rangelands: a synthesis of land management and precipitation effects. *Journal of soil and water conservation*, 62(2): 77-85.
- Eswaran H (1993) An assesment of geographic distribution of soil carbon and nitrogen. Advances in Soil Science press.
- FAO. (2019). Grasslands and carbon sequestration: Potential and practices. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). Grasslands and carbon sequestration: Potential and practices. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fischer, G., Shah, M. M., & Van Velthuizen, H. T. (2002). Climate change and agricultural vulnerability. World Summit on Sustainable Development, Vienna.
- Follett, R. F., & Schuman, G. E. (2005). Grazing land contributions to carbon sequestration. In *Grassland: a global resource*, (pp. 265-277). Wageningen Academic.
- Hall, D.O., & Scurlock, J.M.O. (1991). Climate change and productivity of natural grasslands. *Annals of Botany (Supplement)*, 67: 49-55.
- Hall, D.O., Ojima, D.S., Parton, W.J., & Scurlock, J.M.O. (1995). Response of temperate and tropical grasslands to CO₂ and climate change. *Journal of Biogeography*, 22: 537-47.

- Howden, S. M., Crimp, S.J., & Stokes, C.J. (2008). Climate change and Australian livestock systems: impacts, research and policy issues. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48: 780–788.
- IPCC. (2019). Climate Change and Land: Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2): 1–22.
- Pärtel, M., Zobel, M., Zobel, K., & van der Maarel, E. (2005). The species pool and its relation to species richness: Evidence from Estonian plant communities. *Oikos*, 87(1): 90–98.
- Paudel, P., Sapkota, S., Gyanwali, K., & Adhikari, B. (2021). Comparison of vehicular fuel consumption and CO₂ emission before and during the Covid-19 pandemic in Kathmandu Valley. *Journal of Innovations in Engineering Education*, 4(1): 10-17.
- Osborne, C.P., Salomaa, A., Kluyver, T.A., Visser, V., Kellogg, E.A., Morrone, O., Vorontsova, M.S., Clayton, W.D., & Simpson, D.A. (2014). A global database of C₄ photosynthesis in grasses. *New Phytologist*, 204(3): 441-446.
- Reich, P. B., Hobbie, S. E., Lee, T. D., & Pastore, M. A. (2018). Unexpected reversal of C₃ versus C₄ grass response to elevated CO₂ during a 20-year field experiment. *Science*, 360(6386): 317-320.
- Reid, R. S., Galvin, K. A., & Krusha, R.L. (2008). Global significance of extensive grazing lands and pastoral societies. In: Galvin K.A., editor. *Fragmentation in semi-arid and arid landscapes: consequences for human and natural systems*. Dordrecht, Netherlands.
- Silveira, M. (2012). Pasture Management for Sequestering Carbon. The Florida Cattleman And Livestock Journal. IFAS Extension. <https://rrec-ona.ifas.ufl.edu/media/rrec-onaifasufledu/pdf/or9-12.pdf> (Erişim 18.06.2025)
- Silveira, E., Radelof, V.C., Martínez Pastur, G., Martinuzzi, Sç, Politi, N., Lizarraga, L., Rivera, L., Gavier Pizarro, G., Yin, H.E., Rosas, Y.M., Calamari, N.C., Navarro, M.F., Sica, Y., Olah, A., Bono, J., & Pidgeon, A.M. (2022). Forest phenoclusters for Argentina based on vegetation phenology and climate. *Ecological Applications*, 32(3): e2526.

- Silveira, M. L., Rodrigues da Cruz, P. J., Vendramini, J. M. B., Boughton, E., Bracho, R., & da Silva Cardoso, A. (2024). Opportunities to increase soil carbon sequestration in grazing lands in the southeastern United States. *Grassland Research*, 3(1): 69–78.
- Schimel, D.S., Parton, W.J., Kittel, T.G.F., Ojima, D.S., & Cole, C.V. (1990). Grassland biogeochemistry: links to atmospheric processes. *Climatic Change*, 17: 13-25
- Schuman, G. E., Janzen, H. H., & Herrick, J. E. (2002). Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental pollution*, 116(3): 391-396.
- Soussana, J. F., Tallec, T., & Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4(3): 334-350.
- Thornley, J.H.M., Fowler, D., & Cannell, M.G.R. (1991). Terrestrial carbon storage resulting from CO₂ and nitrogen fertilisation in temperate grasslands. *Plant, Cell and Environment*, 14: 1007– 1011.
- Thornton, P.K., Boone, R. B., & Ramirez-Villegas, J. (2015). Climate change impacts on livestock. CGIAR Resrach program on Climate Change, *Agriculture and Food Security (CCAFS)*, Working Paper No. 120.
- White, R., Murray, S., & Rohweder, M. (2000). Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystems. Washington, DC: World Resources Institute.

BÖLÜM 9

GÖRÜNTÜ İŞLEME VE DERİN ÖĞRENME TABANLI YABANCI OT YÖNETİMİ: YAPAY ZEKA DESTEKLİ GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Araş. Gör. Cihat GEDİK^{1*}
Prof. Dr. Bahadır SAYINCI²

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16370753>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye. cihat.gedik@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar), Orcid ID: 0000-0003-4955-2220

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye. bahadir.sayinci@bilecik.edu.tr, Orcid ID: 0000-0001-7148-0855

GİRİŞ

Yabancı otlar, kültür bitkileriyle aynı ortamda su, ışık ve besin gibi kaynaklar için rekabete girerek ürün verimini ve kalitesini düşürmektedir (Gharde ve ark., 2018). Özellikle istilacı türlerin hızlı yayılımı, mahsul gelişimini baskılamakta ve çevresel sürdürülebilirliği tehdit etmektedir (DiTomaso, 2000). Bu nedenlerle yabancı ot kontrolü yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır.

Geleneksel yabancı ot kontrol yöntemleri, genellikle tarlanın tamamına uygulanan geniş spektrumlu herbisitlerin kullanılmasına dayanmaktadır. Ancak yabancı otların tarlada düzensiz dağılması nedeniyle bu uygulamalar hem ekonomik kaynak israfına yol açmakta hem de çevresel ve sağlık açısından ciddi olumsuzluklar barındırmaktadır (Tiryaki ve ark. 2010). Kültür bitkisi filiz çıkış öncesi ve sonrası kullanılan kimyasal ilaçlar sadece toprağa zarar vermekle kalmamakta, aynı zamanda uygulayıcıların sağlığı açısından da risk oluşturmaktadır. Mekanik ve manuel ayıklama yöntemleri ise genellikle zaman alıcı, yorucu ve istenen düzeyde etkili olmayan uygulamalardır. Bu nedenlerle, mevcut geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek daha hassas ve akıllı kontrol sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapay zekâ (YZ) ve onun bir alt disiplini olan derin öğrenme (DL), tarımsal üretimde hassasiyetin artırılması açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Görüntü işleme teknikleriyle entegre çalışan bu sistemler, bitkisel görsellerdeki örüntüleri tanıma ve sınıflandırma konusunda yüksek başarı sağlamaktadır (Razfar ve ark., 2022). Derin öğrenme, özellikle Evrişimli Sinir Ağları (ESA) mimarisi sayesinde görüntü verilerindeki kenar, doku ve biçim gibi yapısal öğeleri otomatik olarak öğrenerek yabancı otları güvenilir biçimde ayırt edebilmektedir (Hasan ve ark. 2021). Bu bağlamda sahaya özgü yabancı ot kontrolü (Site-Specific Weed Control- SSWC) gibi yaklaşımlar, yalnızca gerekli alanlara müdahale ederek çevresel etkiyi azaltmakta ve kaynak verimliliğini artırmaktadır (Christensen ve ark. 2009). Bu sınırlamaların aşılması ve daha etkili çözümler geliştirilebilmesi amacıyla derin öğrenme yöntemlerine olan yönelim giderek artmıştır. Derin öğrenme tabanlı sistemler, sadece tespitle sınırlı kalmayıp farklı işlevleri eş zamanlı yürütebilme potansiyeline de sahiptir. Bu durum saha uygulamalarında otomasyonu mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada, derin öğrenme destekli görüntü işleme sistemlerinin yabancı ot tespitindeki etkinliği, bu teknolojilerin potansiyeli ve saha uygulamalarına katkıları ele alınacaktır.

2. Türkiye'deki Bazı Yabancı Otlar

Yabancı otların tür çeşitliliği ve yayılım desenleri, bulundukları ekosistemlerin iklimsel, coğrafi ve tarımsal koşullarına bağlı olarak bölgeden bölgeye önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, yabancı otların hangi alanlarda baskın hale geleceğini, hangi türlerin hızla yayılacağını ve tarımsal üretime ne ölçüde zarar vereceğini doğrudan etkilemektedir. Türkiye’de yabancı ot türleri, bulundukları bölgenin iklimsel, coğrafi ve tarımsal koşullarına göre önemli farklılıklar göstermektedir. Bu çeşitlilik, bazı türlerin belirli bölgelerde daha baskın hale gelmesine ve tarımsal verim üzerinde farklı düzeylerde etkilere yol açmasına neden olur. Bu durum, yabancı otlarla mücadelede tek tip ve genellenmiş bir yaklaşımın yetersiz kalmasına neden olmakta, bölgesel ve bitkiye özgü stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Christensen ve ark. 2009). Dolayısıyla, Türkiye’de yürütülen yerel ve bölgesel araştırmalar, yalnızca mevcut yabancı ot türlerinin tespit edilmesi açısından değil, aynı zamanda yabancı ot yönetimine yönelik etkili, çevre dostu ve ekonomik uygulamaların geliştirilmesi için de kritik öneme sahiptir. Türlerin doğru bir şekilde belirlenmesi, bu türlerin yayılma potansiyelinin anlaşılması ve bölgeye özel mücadele yöntemlerinin oluşturulması, uzun vadede sürdürülebilir tarımsal üretim ve girdi maliyetlerinin düşürülmesi açısından stratejik bir gereklilik haline gelmiştir.

Ülkemizde yaygın olarak karşılaşılan geniş yapraklı yabancı otlar arasında horoz ibiği (*Amaranthus retroflexus*), sirken (*Chenopodium album*), pıtrak (*Xanthium strumarium*) ve tarla sarmaşığı (*Convolvulus arvensis*) gibi türler öne çıkmaktadır. Dar yapraklı türler olarak yabancı yulaf (*Avena fatua*), kanyaş (*Sorghum halepense*) ve tilki kuyruğu (*Alopecurus myosuroides*) yaygın şekilde görülmektedir. Parazit ot türleri arasında ise canavar otu (*Orobancha spp.*) ve küsküt (*Cuscuta spp.*) yer alır (Yıldırım ve Ekim, 2003; Töre, 2014; Yarcı ve Altay, 2016; Özasan, 2011; Çevik ve ark. 2020; Keskin ve ark. 2021). Bu türler, başta tahıllar olmak üzere sebze, meyve ve bağ alanlarında yoğun rekabet oluşturarak ürün verimini azaltır. Şekil 1’de Türkiye’de yaygın görünen bazı yabancı ot türlerine görsel olarak yer verilmiştir.



Beyaz hindiba



Kara hindiba



Horoz ibiği



Sirken otu



Pıtrak



Tilki kuyruğu



Çobançantası



Tarla Sarmaşığı



Sütleğen

Şekil 1. Türkiye’de yaygın görünen bazı yabancı otlar

3. Yabancı otların tanınmasında görüntü işlemenin rolü

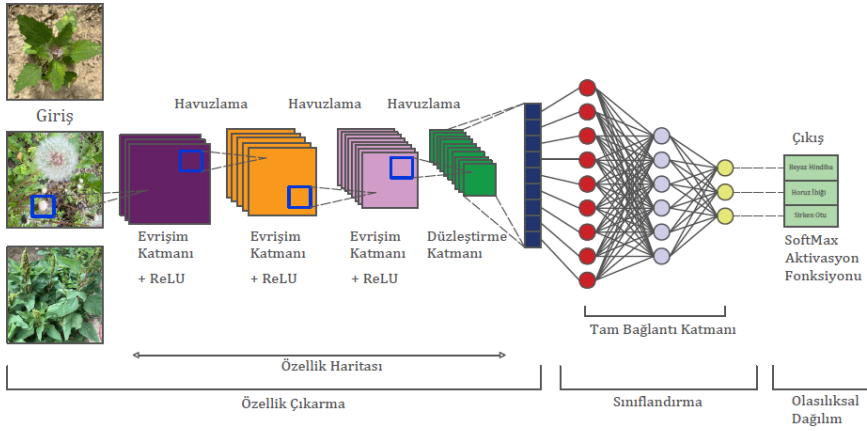
Yabancı otların tarım alanlarında erken ve doğru biçimde tespit edilmesi, verim kayıplarını önlemek ve sürdürülebilir üretimi sağlamak açısından büyük

önem taşır. Özellikle geniş ölçekli tarım arazilerinde, insan gözüyle yapılan kontroller hem zaman alıcıdır hem de istenen doğruluğu sağlayamaz. bu durum da modern, otomatik ve hassas sistemlere olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu nedenle bilgisayarla görme temelli modern teknolojilere dayanan, otomatik ve hassas sistemlerin kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Görüntü işleme teknolojileri, bitki örtüsünün görsel ve spektral özelliklerini analiz ederek yabancı otların hızlı ve güvenilir biçimde ayrıştırılmasına olanak tanır. Yabancı otlara ilişkin veri setlerinin oluşturulması ve tespit amacıyla görüntü elde etmek için RGB kameralar ve çeşitli sensörler kullanılmaktadır. RGB kameralar; bitkilerin renk, şekil ve doku gibi görsel özelliklerini algılayarak temel görüntü verisini sağlar. Bu kameralar sayesinde yabancı otlarla kültür bitkileri arasındaki morfolojik farklar analiz edilebilir. Görüntü verileri, genellikle insansız hava araçları (İHA'lar), uydu platformları ve yer tabanlı sensör sistemleri aracılığıyla toplanmaktadır (Pantazi ve ark., 2016; Lottes ve ark., 2017; Nørremark ve ark., 2012; Demir ve ark. 2019; Sayıncı ve ark. 2015).

4. Derin öğrenme ve evrişimli sinir ağları

Derin öğrenme, görüntü, ses veya metin gibi karmaşık verileri işleyerek anlamlı desenleri otomatik olarak tanıyan çok katmanlı sinir ağı sistemlerine dayalı bir yapay zekâ yaklaşımıdır. Özellikle büyük veri setlerinin analiz edilmesinde başarılı sonuçlar veren bu yöntem, karmaşık örüntüleri insan müdahalesine gerek kalmaksızın öğrenme kapasitesine sahiptir. Derin öğrenmenin temelini oluşturan ESA, manuel özellik çıkarma ihtiyacını ortadan kaldırarak, sınıflandırma ve nesne tespiti gibi görevlerde veriden en anlamlı özellikleri otomatik olarak öğrenebilme kabiliyetine sahiptir (LeCun ve ark., 1998; LeCun ve ark. 2015). Bu yapılar, özellikle büyük hacimli görsel verinin bulunduğu tarım gibi alanlarda, geleneksel görüntü işleme yöntemlerine kıyasla çok daha başarılı sonuçlar vermektedir. Şekil 2'de bir evrişimli sinir ağı mimarisinin katmanları sunulmuştur. Bu yapılarda ilk olarak evrişim (convolution) katmanı yer alır. Evrişim katmanı, görüntü üzerine uygulanan küçük filtreler yardımıyla, kenar, doku, renk ve yaprak şekli gibi temel görsel özellikleri yakalar. Filtreler, görüntü üzerinde belirli adımlarla (stride) kayarak her konumda giriş verisi ile noktasal çarpımlar yapar ve özellik haritaları oluşturur. Görüntü boyutunun korunması ve kenar bilgilerin kaybolmaması için dolgu (padding) işlemi uygulanır. Dolgu, görüntünün çevresine sıfırlar

ekleyerek sınır bölgelerinin de analiz edilmesine imkân tanır. Evrişim işleminden sonra düzeltilmiş doğrusal ünite (Rectified Linear Unit-ReLU) adı verilen bir etkinleştirme fonksiyonu kullanılır. Bu işlem, negatif değerleri sıfıra çekerken pozitif değerleri aynen geçirir ve modele doğrusal kazandırarak karmaşık ilişkilerin öğrenilmesini sağlar (Purwono ve ark. 2022). ESA mimarileri, yalnızca sınıflandırma görevlerinde değil; aynı zamanda nesne algılama, görüntü bölütleme ve sayısal tahmin gibi daha karmaşık problemler için de etkili bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2. Evrişimli sinir ağı mimarisi

Evrişim katmanlarının ardından gelen havuzlama (pooling) katmanı, özellik haritalarının boyutunu küçültmek için kullanılır. En sık kullanılan yöntem olan maksimum havuzlama (max pooling), küçük bölgelerdeki en yüksek değeri seçerek önemli bilgileri korur ve modelin hesaplama yükünü azaltır. Havuzlama aynı zamanda modelin küçük kaymalara ve yerel değişimlere karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Evrişim ve havuzlama katmanlarından elde edilen çok boyutlu matrisleri vektörlere çevirmek için düzleştirme (flattening) işlemi uygulanır. Düzleştirilen veriler, tam bağlantılı (fully connected) katmanlara iletilir. Bu katmanlar, önceki katmanlarda çıkarılan tüm özellikleri bir araya getirerek sınıflandırma kararını oluşturur. Ağın sonunda yer alan softmax katmanı ise, modelin çıktısını olasılık dağılımına çevirir ve hangi sınıfa ait olma olasılığının en yüksek olduğunu belirler.

ESA mimarileri başarısında, yüksek kaliteli ve açıklamalı büyük veri kümeleri önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle bilgisayarla görme alanında yaygın olarak kullanılan ImageNet (Deng ve ark., 2009), COCO (Lin ve ark., 2014), Pascal VOC (Everingham ve ark., 2010) ve Open Images (Kuznetsova ve ark., 2020) gibi geniş ve açık erişim veri kümeleri, sınıflandırma, nesne tespiti ve bölütleme gibi farklı görevlerde model performanslarının değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu veri kümeleri, yabancı ot tespiti ve sınıflandırılması gibi özel tarımsal uygulamalarda aktararak öğrenme (transfer learning) yönteminin kullanılmasına olanak tanımakta ve sınırlı veri ile yüksek doğruluk elde edilmesini kolaylaştırmaktadır.

Derin öğrenme mimarilerinin tarihsel gelişiminde LeNet-5, AlexNet, VGGNet ve ResNet gibi ağlar önemli ESA mimarileridir. LeNet-5, basit karakter tanıma problemleri için geliştirilmişken, AlexNet derin yapısıyla ImageNet yarışmasında çığır açmıştır. VGGNet, küçük filtreler kullanarak derin ağlar inşa etmiş, ResNet ise atlamalı bağlantılar (skip connections) kullanarak çok derin ağlarda yaşanan öğrenme problemlerini aşmıştır. Bu mimariler, özellikle görüntü tabanlı tarımsal uygulamalarda yabancı ot tespiti, bitki hastalıklarının sınıflandırılması, hasat öncesi verim tahmini ve ürün olgunluk analizi gibi karmaşık problemlerde üstün bir şekilde kullanılmakta ve geleneksel yöntemlerle ulaşılamayan doğruluk seviyelerine ulaşmaktadır. ESA tabanlı derin öğrenme modelleri, katmanlar aracılığıyla mekânsal örüntüleri öğrenirken, karar verme aşamasını da etkili bir şekilde geliştirmektedir.

Derin öğrenmeye dayalı yabancı ot tespiti genel olarak iki ana yaklaşıma ayrılmaktadır. Bunlar, sınıflandırma yaklaşımı ve nesne tespiti yaklaşımı derin öğrenme mimarileri.

4.1. Sınıflandırma yaklaşımı derin öğrenme mimarileri

Sınıflandırma yaklaşımı yöntemlerde, sistem bir görüntüde yer alan nesnenin yabancı ot mu yoksa kültür bitkisi mi olduğunu belirlemeye çalışır. Bu tür uygulamalarda görüntüler genellikle tek bir bitkiyi ya da sınırlı sayıda bireyi içerir. Yaprak şekli, rengi, damar yapısı ve doku gibi görsel özellikler, sınıflandırma sürecinde temel belirleyiciler arasında yer alır. Sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan mimariler şunlardır:

- LeNet-5
- AlexNet

- VGGNet
- GoogleNet (Inception)
- ResNet
- DenseNet

Bu mimariler, özellikle yaprak şekli ve rengine göre yabancı ot ile kültür bitkisi ayrımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hasan ve ark. 2021).

4.2. Nesne tespiti yaklaşımli derin öğrenme mimarileri

Nesne tespiti yaklaşımli derin öğrenme yöntemleri, bir görüntüde birden fazla nesnenin hem sınıfını (ne olduğu) hem de konumunu (nerede bulunduğu) aynı anda belirlemeyi hedefler. Bu yöntemlerde, her nesnenin görüntü üzerindeki yerini belirlemek için sınır kutuları (bounding box) kullanılır. Sınır kutusu, nesnenin etrafını saran dikdörtgen bir çerçevedir. Modelin bu sınır kutularını doğru şekilde öğrenebilmesi için eğitim verilerinin, nesne sınıfı (örneğin: “yabancı ot”, “kültür bitkisi”) ve konum bilgisi (x, y, genişlik, yükseklik) içerecek şekilde etiketlenmiş olması gerekir. Etiketleme süreci çoğunlukla manuel olarak yapılır ve modelin başarımını doğrudan etkiler. Bu amaçla LabelImg, CVAT ve Roboflow gibi açık kaynak araçlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, LabelImg kutu çizimlerini hızlıca yapmaya olanak tanırken, Roboflow veri artırma ve format dönüştürme gibi işlemleri desteklemektedir.

Yaygın kullanılan nesne tespiti modelleri arasında şunlar yer alır:

- YOLO (You Only Look Once)
- Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Networks)
- R-FCN (Region-based Fully Convolutional Networks)
- SSD (Single Shot MultiBox Detector)
- MobileNet + SSD

YOLO, görüntüyü tek adımda analiz ederek yüksek hızda nesne tespiti yapar. Bu özelliği sayesinde gerçek zamanlı uygulamalarda sıkça tercih edilir. Ancak küçük nesneleri tespit etmede sınırlamaları olabilir. Faster R-CNN, bölge öneri ağı kullanarak daha hassas tespit sağlar ve doğruluk açısından güçlüdür. Fakat işlem süresi daha uzundur. R-FCN, Faster R-CNN'in hızını artırmak amacıyla tam evrişimli katmanlar kullanır ve büyük veri kümelerinde daha verimlidir. SSD modeli, çoklu ölçekli özellik haritalarıyla çalışarak küçük

ve orta boy nesnelerde dengeli bir performans sunar. MobileNet + SSD ise özellikle düşük güçlü cihazlarda hızlı ve verimli çalışmak üzere geliştirilmiştir. Mobil cihazlar ve gömülü sistemler için uygundur. Bu modeller, uygulama gereksinimlerine göre hız, doğruluk ve donanım ihtiyacı açısından farklı avantajlar sunar (Redmon & Farhadi, 2018; Girshick ve ark. 2015; Liu ve ark. 2016).

5. Derin öğrenme yöntemleriyle yabancı ot tespiti

Son yıllarda makine öğrenmesi, özellikle de derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, klasik görüntü işleme yöntemlerinin ötesine geçerek tarımsal görüntü analizinde önemli bir değişimine yol açmıştır. Derin öğrenme algoritmaları, görüntülerden özellik çıkarımını büyük ölçüde otomatikleştirerek sistemin öğrenme kapasitesini artırmakta ve yüksek doğruluk seviyeleriyle karar destek süreçlerini güçlendirmektedir. Bu gelişmeler sayesinde, farklı gelişim evrelerindeki yabancı otlar güvenilir biçimde tespit edilebilmektedir.

Derin öğrenme tabanlı sistemlerde farklı mimariler başarıyla uygulanmakta ve bu modeller, tarla görüntülerini analiz ederek yabancı otları yüksek doğrulukla ayırt edebilmektedir. Özellikle sınıflandırma odaklı çalışmalarda CNN tabanlı mimariler önemli başarılar elde etmiştir. Örneğin, Milioto et al. (2017), şeker pancarı tarlasında ESA tabanlı bir sınıflandırıcı ile bitki ve yabancı ot ayrımını yüksek doğrulukla gerçekleştirmiştir.

Derin öğrenme tabanlı sistemlerde farklı mimariler başarıyla uygulanmakta ve bu modeller, tarla görüntülerini analiz ederek yabancı otları yüksek doğrulukla ayırt edebilmektedir. Ayrıca, sınırlı veriye sahip tarım alanlarında performansı artırmak amacıyla transfer öğrenme (transfer learning) yaklaşımı sıklıkla tercih edilmektedir (Espejo-Garcia ve ark. 2020; Chen ve ark. 2022). Bu yöntem sayesinde, daha önce geniş veri kümeleri üzerinde eğitilmiş derin öğrenme modelleri, yeni ve daha küçük veri setlerine uyarlanarak etiketli veri eksikliğine rağmen yüksek doğruluk elde edilmesine olanak tanımaktadır (Kamilaris ve ark., 2018; Ofori ve Gayar, 2021).

Sonuç olarak, ESA tabanlı derin öğrenme sistemleri, görsel veriye dayalı problemlerde insan benzeri algı yetenekleri geliştirerek manuel işlem ihtiyacını azaltmakta ve tarım gibi emek yoğun alanlarda otomasyon potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu yapıların, özellikle kültür bitkileri ile yabancı otların ayrımında yüksek doğrulukla çalışması, onları modern tarımsal görüntüleme ve

müdahale sistemlerinin temel bileşeni haline getirmiştir (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

6. Yabancı Ot Kontrolünde Yapay Zeka Destekli Otonom Sistemler

Günümüzde YZ destekli teknolojiler, tarımda yalnızca tanılama ve karar verme aşamalarında değil, aynı zamanda sahada doğrudan uygulama yapabilen otonom sistemler aracılığıyla da etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yabancı ot kontrolü bu uygulamaların en dikkat çeken alanlarından biridir. Görüntü işleme, sensör teknolojisi ve derin öğrenme algoritmalarının entegrasyonu sayesinde geliştirilen sistemler, yalnızca tespitle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda müdahale sürecini de insan müdahalesine gerek kalmaksızın gerçekleştirebilmektedir.

Tarım robotları ve İHA'larla yapılan hedefe yönelik uygulamalar hem girdi maliyetlerinin azaltılmasına hem de kimyasal kullanımının en aza indirilmesine olanak tanımaktadır (Slaughter ve ark., 2008; Bah ve ark., 2018). Görüntü sensörleriyle donatılmış ve YZ algoritmalarıyla çalışan sistemler, tarla içerisindeki bitki ve yabancı otları gerçek zamanlı olarak ayırt edebilmekte ve yalnızca gerekli alanlara müdahalede bulunarak verimlilik sağlamaktadır (Bawden ve ark. 2017; Patel ve ark. 2019).

Genel olarak üç ana müdahale yöntemi ile çalışmaktadır (Tablo 1). Bunlar; püskürtme sistemleri, lazer tabanlı sistemler, fiziksel robotik müdahale sistemlerdir.

Tablo 1. YZ tabanlı yabancı ot yok etme sistemleri

Müdahale Türü	Açıklama	Örnek Sistemler
Hedef odaklı Püskürtme Sistemleri	Görüntü işleme ve derin öğrenme algoritmaları ile yalnızca yabancı otlara ilaç püskürtülür.	John Deere See & Spray, ecoRobotix, Bosch Smart Spraying, WeedSeeker
Lazer Tabanlı Sistemler	Otlar tespit edilerek yüksek enerjili lazer darbeleriyle fiziksel olarak imha edilir.	Carbon Robotics – LaserWeeder, Weedbot
Fiziksel Müdahale Sistemleri	Otlar robotik kollar, bıçaklar veya mekanik sistemlerle sökülür ya da toprak işlenerek yok edilir.	Naïo Technologies Robotik ot sökücüler,

İHA'lar ile donatılmış sistemler, yüksek çözünürlüklü RGB veya multispektral kameralarla geniş alanlarda yabancı ot yoğunluğunu haritalayarak, yer tabanlı müdahale sistemlerine entegre olabilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde tarla ölçeğinde haritalama ve veri tabanlı hassas uygulamalar mümkün hâle gelmiştir (Torres-Sánchez ve ark., 2015).

Sonuç

Yabancı otlar, bitkisel üretimde verim kaybına neden olan ve önemli ekonomik zararlara yol açan temel problemlerden biridir. Geleneksel mücadele yöntemlerinin sınırlılıkları, bu alanda daha hassas, çevre dostu ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda yapay zekâ, özellikle görüntü işleme ve derin öğrenme teknolojileri ile tarım sektöründe yenilikçi uygulamaların önünü açmaktadır.

Bu çalışmada, yabancı otların tespiti ve kontrolüne yönelik YZ uygulamalarının teorik temelleri, kullanılan algoritmalar, otonom sistemler ve başarılı örnekleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Görüntü işleme tekniklerinin bitki-yabancı ot ayrımındaki etkinliği, derin öğrenme modellerinin sınıflandırma başarısı ve otonom sistemlerin sahadaki uygulama kapasitesi, bu teknolojilerin hem günümüzde hem de gelecekte önemli bir rol oynayacağını göstermektedir.

Tarımsal uygulamalarda, özellikle bir görüntüde birden fazla bitkinin yer aldığı durumlarda, YZ tabanlı yaklaşımlar daha verimli ve hedefe yönelik sonuçlar sunmaktadır. Görüntülerdeki yabancı otların doğru bir şekilde yerleştirilmesi, hassas ilaçlama sistemleriyle entegre çalışmayı mümkün kılmakta ve kaynak kullanımında ciddi tasarruf sağlamaktadır.

Derin öğrenme destekli yabancı ot tanıma sistemleri, erken teşhis ve isabetli müdahale olanaklarıyla tarımsal mücadele süreçlerini daha planlı ve etkin hale getirmektedir. Bu sayede gereksiz pestisit kullanımı azaltılmakta, çevreye zarar en aza indirgenmekte ve sürdürülebilir tarım hedeflerine katkı sunulmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin uygulanmasında bazı engeller hâlen varlığını sürdürmektedir. Veri eksikliği, modellerin farklı koşullara genelleyebilme zorlukları, teknik altyapı gereksinimleri ve çiftçilerin bu teknolojilere erişimindeki kısıtlar önemli başlıklar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, açık veri paylaşımı, eğitim programları, düşük maliyetli

sistem çözümleri ve model optimizasyonları gibi stratejiler, bu zorlukların aşılmasını mümkün kılacaktır.

Kaynakça

- Bah, M. D., Hafiane, A., & Canals, R. (2018). Deep Learning with Unsupervised Data Labeling for Weed Detection in Line Crops in UAV Images. *Remote Sensing*, 10(11), 1690.
- Bawden, O., Kulk, J., Russell, R., McCool, C., English, A., Dayoub, F., ... & Perez, T. (2017). Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*, 34(6), 1179-1199.
- Blue River Technology. (2020). See & Spray Technology. Retrieved from <https://www.bluerivertechnology.com>
- Chen, D., Lu, Y., Li, Z., & Young, S. (2022). Performance evaluation of deep transfer learning on multi-class identification of common weed species in cotton production systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107091.
- Christensen, S., Søgaard, H. T., Kudsk, P., Nørremark, M., Lund, I., Nadimi, E. S., & Jørgensen, R. (2009). Site-specific weed control technologies. *Weed Research*, 49(3), 233-241.
- Çevik Küçük, Ö., Arslan, Z. F., & Aksoy, N. (2020). Sakarya İli Dış Mekân Süs Bitkileri Bahçelerinde Sorun Olan Yabancı Otlar ve Mevcut Sorunlara Yönelik Öneriler. *Turkish Journal of Weed Science*, 23(2).
- Demir, B., Sayinci, B., Çetin, N., Yaman, M., & Çömlek, R. (2019). Shape Discrimination of Almond Cultivars by Elliptic Fourier Descriptors. *Erwerbs-obstbau*, 61(3).
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009, June). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In *2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 248-255). Ieee.
- DiTomaso, J. M. (2000). Invasive weeds in rangelands: species, impacts, and management. *Weed science*, 48(2), 255-265.
- Espejo-Garcia, B., Mylonas, N., Athanasakos, L., Fountas, S., & Vasilakoglou, I. (2020). Towards weeds identification assistance through transfer learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105306.
- Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K., Winn, J., & Zisserman, A. (2010). The pascal visual object classes (voc) challenge. *International journal of computer vision*, 88, 303-338.

- Gharde, Y., Singh, P., Dubey, R., & Gupta, P. (2018). Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India. *Crop Protection*, 107, 12–18.
- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., & Malik, J. (2015). Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 38(1), 142-158.
- Hasan, A. M., Sohel, F., Diepeveen, D., Laga, H., & Jones, M. G. (2021). A survey of deep learning techniques for weed detection from images. *Computers and electronics in agriculture*, 184, 106067.
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90.
- Keskin, B., Temel, S., Çakmakçı, S., Tosun, R. (2021). Bazı Horoz İbiği (*Amaranthus* spp.) Çeşitlerinin Kurak ve Sulu Şartlardaki Tohum Verimleri ve Verim Unsurları Üzerine Araştırma. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 52(1), 11-19.
- Kuznetsova, A., Rom, H., Alldrin, N., Uijlings, J., Krasin, I., Pont-Tuset, J., ... & Ferrari, V. (2020). The open images dataset v4: Unified image classification, object detection, and visual relationship detection at scale. *International journal of computer vision*, 128(7), 1956-1981.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (2002). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324.
- Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., ... & Zitnick, C. L. (2014, September). Microsoft coco: Common objects in context. In *European conference on computer vision* (pp. 740-755). Cham: Springer International Publishing.
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. Y., & Berg, A. C. (2016, September). Ssd: Single shot multibox detector. In *European conference on computer vision* (pp. 21-37). Cham: Springer International Publishing.
- Lottes, P., Khanna, R., Pfeifer, J., Siegwart, R., & Stachniss, C. (2017, May). UAV-based crop and weed classification for smart farming. In *2017*

- IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 3024-3031). IEEE.
- Milioto, A., Lottes, P., & Stachniss, C. (2017). Real-time blob-wise sugar beets vs weeds classification for monitoring fields using convolutional neural networks. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 41-48.
- Nørremark, M., Griepentrog, H. W., Nielsen, J., & Søgaaard, H. T. (2012). Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area. *Precision agriculture*, 13(2), 149-162.
- Ofori, M., & El-Gayar, O. (2021). An approach for weed detection using CNNs and transfer learning.
- Özaslan, C. (2011). Diyarbakır ili buğday ve pamuk ekim alanlarında sorun olan yabancı otlar ile üzerindeki fungal etmenlerin tespiti ve bio-etkinlik potansiyellerinin araştırılması. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Pantazi, X. E., Moshou, D., & Tamouridou, A. A. (2016). Automated leaf disease detection in different crop species through image features analysis and One Class Classifiers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 132, 141-148.
- Partel, V., Kakarla, S. C., & Ampatzidis, Y. (2019). Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 339-350.
- Purwono, P., Ma'arif, A., Rahmانيar, W., Fathurrahman, H. I. K., Frisky, A. Z. K., & ul Haq, Q. M. (2022). Understanding of convolutional neural network (cnn): A review. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(4), 739-748.
- Razfar, N., True, J., Bassiouny, R., Venkatesh, V., & Kashef, R. (2022). Weed detection in soybean crops using custom lightweight deep learning models. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100308.
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*.

- Sayıncı, B., Kara, M., Ercişli, S., Duyar, Ö., & Ertürk, Y. (2015). Elliptic Fourier analysis for shape distinction of Turkish hazelnut cultivars. *Erwerbs-obstbau*, 57(1), 1-11.
- Slaughter, D. C., Giles, D. K., & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1), 63-78.
- Tiryaki, O., Canhilal, R., & Horuz, S. (2010). Tarım ilaçları kullanımı ve riskleri. *Erciyes üniversitesi fen bilimleri enstitüsü fen bilimleri dergisi*, 26(2), 154-169.
- Torres-Sánchez, J., Pena, J. M., de Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104-113.
- Töre, Y. (2014). Tokat ili buğday ekiliş alanlarında yabancı ot florasının belirlenmesi. *Türkiye Herboloji Dergisi*, 17(1), 18-27.
- Altay, V., & Yarcı, C. (2016). Kocaeli ve çevresindeki tarım alanlarının yabancı ot florası. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 9(2), 148-171.
- Yıldırım, A., & Ekim, T. (2003). Orta Anadolu Bölgesi yabancı ot florası. *Bitki Koruma Bülteni*, 43(1-4), 1-98.

BÖLÜM 10

SİSTEMATİKTEN EKOFİZYOLOJİYE BİR DEĞERLENDİRME: *Ricinus communis* L. ÖRNEĞİ

Dr. Öğr. Üyesi Nurgül ERGİN¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16372046>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Bilecik, Türkiye. nurgulergin180@gmail.com,
Orcid ID: 0000-0003-3105-7504

GİRİŞ

Hintyağı bitkisi (*Ricinus communis* L.) tohumlarındaki yüksek oranda risinoleik asit içeren yağı sayesinde, başta farmasötik ve kozmetik olmak üzere birçok endüstride stratejik öneme sahip bir bitkidir. Doğrudan insan beslenmesinde kullanılmayan bir yağ bitkisidir. Sütleggengiller (Euphorbiaceae) familyasına ait olan bu tür, *Jatropha curcas* (hint fıstığı), *Hevea brasiliensis* (kauçuk ağacı) ve *Manihot esculenta* (manyok) gibi ekonomik değeri yüksek bitkilerle aynı taksonomik grupta yer almaktadır. Yaklaşık 7500 türü barındıran bu geniş familyanın en önemli türlerinden birisidir (Kumaraswamy ve ark., 2022). Tropikal ve subtropikal iklim kuşaklarında doğal yayılış gösteren *R. communis*, geniş adaptasyon yeteneği sayesinde farklı coğrafyalarda başarıyla yetiştirilebilmektedir. Biyodizel üretiminden kimya sanayiine, ilaçlardan tarımsal biyopestisitlere kadar çok çeşitli alanlarda değerlendirilmektedir. Ancak bitkinin tohumlarında bulunan yüksek toksisiteye sahip risin proteini, özellikle işlenmemiş ürünlerin kullanımı açısından dikkatli değerlendirme gerektirmektedir (Ramanjaneyulu ve ark., 2013; Saadaoui ve ark., 2017).

Tarihsel kayıtlarda *Palma christi* olarak anılan bu tür, M.Ö. 16. yüzyılda Ebers papirüslerinde şifa verici özellikleriyle tanımlanmış ve Antik Mısır, Yunan ve Afrika medeniyetlerinde tıbbi amaçlarla kullanılmıştır (Ogunniyi, 2006; Mutlu ve Meier, 2010). İlk botanik tanımlamaları Hieronymus Bock ve Von Fischer-Benzon tarafından yapılan hintyağı bitkisi, geleneksel tıpta ülser, konsitipasyon, inflamasyon, astım, cilt lezyonları ve romatizmal rahatsızlıklar gibi sağlık sorunlarına karşı kullanılmaktadır (Scarpa ve Guerci, 1982; Azadmard-Damirchi ve ark., 2011; Polito ve ark., 2019). Ayrıca modern sanayide naylon, vernik, mürekkep, karton, duvar kağıdı üretimi gibi çok sayıda sektörde işlevsel bir hammadde olarak değerlendirilmektedir (Da Silva ve Vieira, 2010; Vasco-Leal ve ark., 2022).

Hintyağı bitkisi'nin botanik özellikleri incelendiğinde morfolojik çeşitliliği, hızlı büyüme potansiyeli, kuraklığa karşı dayanıklılığı ve sekonder metabolit üretimiyle dikkat çeken bir model bitki niteliğindedir. Bu bölümde, hintyağı bitkisinin sistematik konumundan başlayarak, morfolojik, anatomik ve fizyolojik özellikleri ile ekolojik adaptasyon yetenekleri bütüncül bir yaklaşımla ele alınacaktır. Bitkinin farklı çevresel koşullara gösterdiği uyum ve bu

süreçlerde rol oynayan botanik yapılar değerlendirilmiştir. Ayrıca bu derleme ile, *R. communis* L.'nin botanik özelliklerine dair bütüncül bir çerçeveye sunulması ve gelecekteki araştırmalara öncülük etmesi hedeflenmektedir.

1. SİSTEMATİK KONUMU

Ricinus communis L., Çiçekli Bitkiler (Angiospermae) içinde yer alan ve oldukça geniş bir tür çeşitliliğine sahip Euphorbiaceae familyasına ait tek türden oluşan monotipik bir cinstir (Weiss, 1983; Ramprasad ve Bandopadhyay, 2010). Bitki, taksonomik sınıflandırmada aşağıdaki şekilde yer almaktadır:

- **Alem:** Plantae
- **Bölüm:** Magnoliophyta (Angiospermiler)
- **Sınıf:** Magnoliopsida (İki çenekliler)
- **Takım:** Malpighiales
- **Familya:** Euphorbiaceae
- **Cins:** *Ricinus*
- **Tür:** *Ricinus communis* L.

Euphorbiaceae familyası, yaklaşık 300 cins ve 7500'den fazla tür içermekte olup özellikle lateks içeriği, monoik çiçek yapıları ve çeşitli meyve formları ile karakterizedir (Webster, 1994). Familya üyeleri tropik kuşaklarda yaygın olmakla birlikte, ılıman bölgelerde de temsilcilerine rastlanmaktadır. *Ricinus communis*, bu aile içinde farklı morfolojik ve fizyolojik özellikleriyle dikkat çeken ve ekonomik değeri en yüksek olan türlerden biridir.

Filogenetik analizler, *Ricinus* cinsinin Euphorbiaceae içindeki yerinin belirlenmesinde moleküler verilerin önemini ortaya koymuştur. Özellikle nükleer ribozomal DNA ve kloroplast DNA dizileri üzerinde yapılan çalışmalar, bu türün taksonomik konumunun sağlam temellere dayandığını ve yakın akraba cinslerden belirgin genetik ayrımlara sahip olduğunu göstermektedir (Wurdack ve ark., 2005; Dong ve ark., 2023).

Hintyağının dünya genelindeki taksonomik değerlendirmelerinde bazı varyete ve formlar tanımlanmış olsa da bu tür genellikle tek tür olarak ele alınmaktadır. Ancak, farklı iklim ve toprak şartlarına gösterdiği uyum nedeniyle, yerel popülasyonlar arasında önemli morfolojik ve fizyolojik varyasyonlar gözlemlenebilmektedir (Chaudhari ve ark., 2019; Nour ve ark., 2023). Bu ekotipik çeşitlilik, bitkinin adaptasyon yeteneğinin yüksek olduğunu

göstermekte ve yerel genotiplerin yeniden sistematik olarak incelenmesini gündeme getirmektedir (Peña-Urbe ve ark., 2022; Yamanura ve ark., 2024).

2. ANATOMİK VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLER

Ricinus communis L., görünüş itibarıyla otsu ya da odunsu yapıya sahip olabilen, genellikle tek yıllık ancak uygun iklim koşullarında çok yıllık olarak da gelişebilen bir bitkidir. Bitkinin morfolojik yapısı çevresel koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmekte; bu durum ekotipik varyasyonlara ve adaptasyon kabiliyetine işaret etmektedir.

2.1. Kök Anatomisi ve Morfolojisi

Hintyağı bitkisinin kökleri primer büyüme döneminde tipik eudikot yapıdadır. Epiblem, korteks ve merkezi silindir belirgindir. Ksilem elementleri radyal düzende, floem ise ksilem ışınları arasında yerleşmiştir. Kök korteksi, büyük vakuollü parankima hücrelerinden oluşur (Dastagir ve Hussain, 2010). Tuz ve kuraklık stresi altında kök korteksinde lignifikasyon ve periderm kalınlaşması gözlenmiştir (Rodrigues ve ark., 2020). Stres koşullarında yapılan anatomik incelemeler, köklerde sklerenkima dokusunun arttığını ve iletim demetlerinde daha kalın hücre çeperleri oluştuğunu göstermektedir.

Hintyağı bitkisi morfolojik özelliklerine göre uzun boylu (high-stalk) ve kısa boylu/cüce (dwarf) tipler olarak sınıflandırılmaktadır. Uzun tip bitkiler belirgin yan ve ikincil köklere sahip, iyi gelişmiş bir kazık kök sistemi ile karakterizedir. Cüce tiplerde ise kök gelişimi genellikle çeşide veya uygulanan kültürel işlemlere bağlı olarak farklılık gösterebilmekte ve kazık kök yapısı daha az belirginlik arz etmektedir (Weiss, 1983).

Bu bitki, genel olarak güçlü bir kazık kök sistemine sahiptir. Tek yıllık bireylerde kök derinliği 1,5-3 metreye ulaşabiliyorken, çok yıllık bireylerde bu derinlik 5-6 metreye kadar çıkabilmektedir. Özellikle yan kökler, bitkinin topraktan maksimum düzeyde yararlanabilmesi açısından büyük önem taşımakta olup, iyi işlenmiş toprak koşullarında yatay olarak 1 metreye kadar yayılım gösterebilmektedir. Ana kökün derinlere inmesi ve yan köklerin geniş bir toprak hacmine yayılması, bitkinin hem stabil gelişimini desteklemekte hem de kuraklık gibi çevresel stres koşullarında su ve besin maddelerine erişimini kolaylaştırarak adaptif avantaj sağlamaktadır (Hussen, 2022; Anonim, 2025a).

Kurak iklim koşullarında yalnızca yağışa bağlı olarak yetiştirilen alanlarda, bitkinin toprak üstü aksamının (gövde, yaprak vb.) gelişimi, kök sistemine kıyasla daha yavaş ilerleme eğilimindedir. Bu durum, bitkinin kurak koşullara adaptasyonunda kök gelişiminin öncelikli olduğunu göstermektedir. Özellikle iyi gelişmiş bir kök sistemi, toprak neminden en üst düzeyde yararlanmayı sağlayarak bitkinin kuraklığa karşı dayanıklılığını artıran temel unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Lakshmamma ve ark., 2010).

Ayrıca kök sisteminin etkinliği, bitkinin besin ve suya erişimini kolaylaştırması nedeniyle biyokütle birikimi ve dolayısıyla verim ile güçlü bir ilişki içerisinde. Bu bağlamda, hintyağı bitkisinin gevşek ve iyi drene olan topraklarda yetiştirilmesi, kök gelişimini desteklemesi açısından önemli bir avantaj sağlamakta; bu da nihai verimin artırılmasına katkıda bulunmaktadır (Salihu ve ark., 2014).

2.2. Gövde Anatomisi ve Morfolojisi

Genç gövdelerde tipik olarak epidermis, korteks ve merkezi iletim demetleri görülür. Epidermis, kutikula ile örtülmüş ve genellikle tek sıralıdır. Korteks hücreleri kollenkimatiktir ve mekanik destek sağlar. İletim demetleri bikollateral düzende olup ksilem içte, floem dışta bulunur. Ksilemde geniş trakeid ve trake hücreleri göze çarpar. Gövde yapısı büyüme aşamalarında lignifikasyon gösterir; bu da mekanik direncin artmasını sağlar (Chick, 1899). Ayrıca, bazı çalışmalarda gövdede bulunan ekstraktif bez hücrelerinin (resin kanalları) antimikrobiyal savunma sistemine katkı sağladığı bildirilmiştir (Abomughaid ve ark., 2024).



Resim 1: Hintyağı bitkisinin gövdesi (Anonim, 2025b)

Hintyağı bitkisi genellikle dik bir formda gelişir ve yetiştirme koşullarına bağlı olarak 1,5 ile 5 m arasında boylanabilir. Sap yapısı morfolojik varyasyon gösterebilmekte; çoğunlukla yuvarlak kesitli olan sap, yeşilden kırmızıya veya mora kadar farklı renklerde olabilir. Doğal ortamda bu sapsar, yüzeyi kaplayan mumsu katman nedeniyle mavimsi bir görünüm kazanabilir ve yaşlandıkça tabanda grimsi renge dönebilir (Hussen, 2021). Genç dönemlerinde sap dokularında bulunan plastitler sayesinde sap, bir dereceye kadar fotosentetik aktivite gösterebilir. Sapın dallanma tipi yoğun olup çoğunlukla monopodialdır; nadiren bazı kùltivar düzeyinde simpodial gelişime rastlanabilir (Resim 1). Cüce tiplerde yaşlanmaya bağılı olarak sapın içi oyuklaşabilir, oysa büyük, ağaç benzeri formda olan uzun boylu tiplerde sap belli bir uzunluğa kadar dolgun ve sağlam kalabilir. Boğumlarda yer alan düğümler genellikle birer yaprak taşıır ve bu düğümler, özellikle ilk çiçek salkımının oluştuğı boğumun -altıncı ile on ikinci arası- erken olgunlaşma ile ilişkilendirilmesi nedeniyle agronomik açıdan kritik kabul edilir. Bu morfolojik farklılıklar ve boy uzunluğundaki çeşitlilik, özellikle çalımsı kısa boylu tipler ile uzun boylu tipler arasında yapılan karşılaştırmalı morfo-fizyolojik ve proteomik analizlerde ayrıntılı şekilde belgelenmiştir. Cüce tip ile yüksek boylu tip arasında yapılan bir çalışmada, sap yapısı, boğum araları, dallanma düzeni ve fotosentetik kapasite gibi karakterlerde belirgin farklılıklar bulunmuş; bu farklılıkların üretim potansiyeli ve adaptasyon stratejileriyle doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Hu ve ark., 2016; Oliveira ve ark., 2019).

Bitki yüksekliğini veya ana dal sayısını sınırlandırmak amacıyla uygulanan budama işlemleri, uzun formdaki hintyağı bitkilerinde genellikle sınırlı başarı göstermektedir. Her ne kadar budama, dallanmayı artırarak verim potansiyelini yükseltebilse de uygulama maliyetinin verim artışından daha yüksek olması ekonomik açıdan dezavantaj oluşturabilir. Örneğin, 30–60 cm yükseklikten yapılan budama, bitki boyunu düşürüp dallanmayı artırsa da toplam verimi azaltma riski taşımaktadır (Lakshmamma ve ark., 2009; Salihu ve ark., 2014).

2.3. Yaprak Anatomisi ve Morfolojisi

Yaprakları dorsoventral yapıdadır. Epidermis genellikle tek sıralı hücrelerden oluşur. Üst epidermis kalın kutikula ile kaplıdır; bu katman,

kuraklığa karşı koruma sağlar. Alt epidermiste parakistik tipte stomalar bulunur (AL-Hadeethi ve ark., 2021). Stoma sıklığı, çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Yaprak yüzeyinde çok sayıda tüy (trikom) ve salgı hücresi gözlenmiştir. Bu yapılar özellikle tuz ve ağır metal streslerine karşı bitkinin toleransında önemli rol oynamaktadır.

Palizat parankiması genellikle 1-2 sıralı silindirik hücrelerden oluşur; fotosentezin büyük kısmı bu hücrelerde gerçekleşir. Sünger parankiması ise daha seyrek diziliş gösteren ve gaz alışverişine olanak sağlayan hücrelerden oluşur. Morfotiplere göre palizat ve sünger parankiması oranlarında farklılıklar gözlenmiştir (Rodrigues ve ark., 2020).

Hintyağı bitkisinin yaprakları büyük, genellikle koyu, parlak yeşil renkte ve 15 ila 45 cm uzunluğa ulaşabilen yaprak ayasına sahiptir. Uzun sapları ile dikkat çeken bu yapraklar, avuç içi şeklinde olup beş ila on bir arasında değişen sayıda lob içerir. Yaprakların alt yüzeyinde belirgin damar yapısı mevcuttur. Kotiledonların hemen üzerinde yer alan iki zıt yaprak dışında, tüm yapraklar gövde üzerinde alması dizilim göstermektedir.

Yaprak renginde gözlenen varyasyon, büyük ölçüde antosiyanin pigmentasyon düzeyine bağlıdır. Bazı bireylerde yapraklar genç dönemde koyu kırmızımsı mor ya da bronz renklerde gelişmekte; zamanla, olgunlaşma sürecinde kırmızımsı bir tonla birlikte koyu yeşile dönüşmektedir (Resim 2). Diğer taraftan bazı bireylerde yapraklar başlangıçtan itibaren yeşil renkte olup, klorofil taşıyan kısımların doğal rengini örten yoğun pigmentasyon da gözlenebilir.



Resim 2: Genç (sol) ve olgunlaşma dönemindeki (sağ) hintyağı bitkisi yaprakları (Anonim, 2025c)

Yaprakların büyüme ve genişleme kapasitesi, -özellikle yeterli toprak neminin sağlandığı koşullarda- uzun süreli güneş ışığı altında dahi olumsuz etkilenmemektedir. Ancak su stresinin ortaya çıkması durumunda yaprak gelişimi belirgin şekilde yavaşlamakta; bunun sonucunda kuru mevsimlerde yaprak dökümü artmakta ve fotosentetik yüzey alanında azalma meydana gelmektedir. Bu durum, mevsim boyunca gözlenen verim kayıplarının başlıca nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, bazı bakteriyel ve fungal etmenlerin neden olduğu yaprak hastalıkları da bitkinin fotosentetik kapasitesini sınırlayarak verimi olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Salihu ve ark., 2014).

2.4. Çiçek Anatomisi ve Morfolojisi

Hintyağı bitkisinde çiçeklenme monoik yapıda olup aynı bireyde erkek ve dişi çiçekler ayrı ayrı bulunur ancak her ikisi de aynı çiçek durumunda (sıklıkla terminal salkım) yer alır (Resim 3A). Bununla birlikte, bazı bireylerde yalnızca dişi çiçekler (pistillat) ya da dişi ve erkek çiçeklerin karışık şekilde serpiştirildiği çiçeklenme düzenleri de gözlemlenebilir. Erkek çiçekler genellikle salkımın alt kısmında yer alır ve taç yaprak içermez (Resim 3B ve 3C). Bu çiçeklerin, üç ila beş parçaya derin şekilde bölünmüş yeşil kaliks yaprakları, çok sayıda dallanmış sarı stamen ile çevrilidir. Dişi çiçekler ise salkımın üst kısmında konumlanır ve yine taç yaprak içermez. Ancak kaliks'in üç dar parçası kırmızımsı renkte olup, merkezde yer alan yumurtalık, derin şekilde parçalanmış iplikli kırmızı stillerle çevrelenmiştir.

Çiçekler 1-1,5 cm çapındadır. Çiçek salkımları ise yaklaşık 100 cm uzunluğa ulaşabilmektedir. Ancak çiçeklenme uzunluğu, çiçekler arası mesafe, erkek-dişi çiçek oranı ve verimli dişi çiçek sayısı bakımından yüksek düzeyde değişkenlik gösterdiğinden, bu uzunluk doğrudan verimle ilişkilendirilemez. Çoğu çeşitte dişi çiçekler, erkek çiçeklerden önce açılırken (dikogami); bazı genotiplerde bunun tersi bir durum da gözlemlenebilir (Naik, 2019).



Resim 3: Hintyağı bitkisinin çiçeklerinin genel görünüşü (A), dişi çiçek (B), erkek çiçek (C) (Anonim, 2025d; 2025f ve 2025e)

Erkek çiçekler açıldıktan sonra 1 ila 2 gün içerisinde yoğun biçimde polen üretir. Polen dökülmesi genellikle gün doğumundan 2-3 saat önce başlayarak öğleden sonraya kadar devam eder ve çoğunlukla sabahın ortasında maksimum düzeye ulaşır. Polen salımı, yaklaşık %60 bağıl nem ve 26-29 °C sıcaklık aralığında optimum düzeyde gerçekleşir. Dişi çiçeklerin stigma yüzeyi, açıldıktan sonra 5 ila 10 gün boyunca döllenmeye açık kalabilir. Dişi ve erkek çiçeklerin açılma zamanları arasındaki fark ise genotipe bağlı olarak 3 ila 7 gün arasında değişebilmektedir (Salihu ve ark., 2014; Lavanya ve ark., 2019).

2.5. Meyve ve Tohum Anatomisi ve Morfolojisi

Hintyağı bitkisinde meyve ve tohum kendine özgü özelliklere sahiptir.

2.5.1.Meyve

Hintyağı bitkisinin meyvesi, olgunlaştığında sertleşen ve kırılğan bir yapı kazanan, dikenli küresel kapsül formundadır. Botanik açıdan genellikle “şizokarp” tipinde olan bu meyve, olgunlaştığında üç bölmeli kapsüle (regma) ayrılarak parçalanır ve bu süreçte oluşan mekanik basınçla, tohumlar kapsül

dışına fırlatılır. Kapsül morfolojisi, çeşitler arasında önemli farklılıklar gösterebilir. Bazı çeşitlerde dikenler ilkel ve yumuşak olup, kapsül yüzeyi esnek ve tahriş etmeyecek şekilde yapılandırılmışken; bazı genotiplerde kapsül dikenleri sert, keskin ve tahriş edici özellikte olabilir (Resim 4).



Resim 4: Hintyağı bitkisinin meyveleri, dikenli (A), dikensiz (B) (Chakrabarty, 2021).

Döllenme sonrası kapsül oluşumu genellikle 3 ila 7 gün içinde başlamakta ve salkımlar, kapsüllerin yerleşimine göre konik, silindirik veya oval şekillerde gelişebilmektedir. Bu kapsül dizilişi, kompakt, yarı kompakt veya gevşek olarak sınıflandırılabilir. Özellikle kapsüller arasındaki mesafenin fazla olması, zararlıların neden olabileceği hasarın azaltılmasında etkili bir özelliktir. Kapsül rengi de çeşitler arasında büyük değişkenlik gösterir; açık yeşilden şarap kırmızısına kadar geniş bir renk skalasında gözlemlenebilir (Greenwood ve Bewley, 1981).

Tohumların olgunlaşması, fide çıkışından itibaren genotipe bağlı olarak ortalama 140 ila 160 gün arasında gerçekleşmektedir. Genellikle en alt konumdaki çiçek salkımları önce olgunlaşmakta, diğer salkımların olgunlaşması ise gövde boyunca yukarıdan aşağıya doğru sıralı biçimde gerçekleşmektedir. Ancak bazı yabani formlarda bu olgunlaşma süreci düzensizdir ve ilk meyve ile son meyvenin olgunlaşması arasında birkaç haftaya varan farklar olabilmektedir (Milani ve de Medeiros Nbrig, 2013).

Kapsülün olgunlukta sergilediği davranış da çeşide bağlı olarak değişmektedir. Bazı çeşitlerde kapsül tamamen açılarak tohumlarını serbest bırakırken, bazıları açılmadan kuruyarak bütün hâlde salkımdan düşmektedir. Kapsül duvarının sertlik derecesi, genetik yapının bir yansıması olup hem mekanik hasat hem de tohum çıkarımı açısından önemli bir etkidir. Sert kapsüller, mekanik kabuk soyma işlemini zorlaştırırken; çok yumuşak kapsüller ise tohumun zarar görmeden ayrılmasını güçleştirebilmektedir (Hocking, 1982).

2.5.2. Tohum

Tohumlar üç tabakalı yapıdan oluşur: testa (tohum kabuğu), endosperm ve embriyo. Testa, antiklastik epidermal hücrelerden oluşur ve lignifiye yapıdadır. Endosperm hücreleri nişasta ve yağ ile doludur. Embriyo aksenal olarak uzamış kotiledonlardan oluşur. Embriyo içinde belirgin damar yapıları görülmektedir (Guo ve ark., 2020). Tohumların mikroskobik yapısında özellikle yağ birikim bölgeleri, sitoplazmada risinoleik asit içeren yağ damlacıklarıyla zengindir. Bu içerikler, embriyonik gelişim sırasında enerji kaynağı olarak kullanılır.

Hintyağı bitkisinin her bir kapsülü, uzunlamasına oval, karemsi veya yuvarlak şekilli olabilen üç adet tohum içerir. Tohumlar, iç kısmında beyaz bir embriyoyu çevreleyen ince, kırılgan yapılı bir testa (tohum kabuğu) ile kaplıdır. Testa, farklı genotiplere bağlı olarak değişen renk desenleri sergiler; beyazdan koyu kahverengimsi kırmızıya, çikolata tonlarından siyaha kadar çeşitli renkler görülebilir (Salihu ve ark., 2019). Bununla birlikte, genellikle kabuk üzerinde dikkat çekici benekler ya da desenler mevcuttur. Tohumların baş kısmında caruncle adı verilen sünger benzeri bir yapı bulunmakta ve ekilen tohum buradan su almaktadır (Resim 5).



Resim 5: Hintyağı bitkisinin tohumları (Orijinal)

Tohum boyutları da oldukça değişkendir. Uzunlukları birkaç milimetreden 25 mm'ye, genişlikleri ise yaklaşık 5 ila 16 mm'ye kadar değişebilir. Tohum iriliğine bağlı olarak 100 tohumun ağırlığı 9 g ile 100 g arasında değişim göstermektedir. Bu çeşitlilik sadece farklı hintyağı çeşitleri arasında değil, aynı birey üzerindeki farklı salkımlar arasında da gözlemlenebilmektedir. Genel eğilim olarak, bir bitkide üretilen toplam tohum sayısı azaldıkça, bireysel tohumların ağırlığı artış göstermektedir.

Hintyağı tohumlarının çimlenme gücü de genotipe bağlı olarak farklılık arz eder. Bazı çeşitlerin tohumları hasattan hemen sonra özel bir ön işleme gerek kalmadan çimlenebilirken, bazı çeşitlerde tohumlar birkaç ay süren fizyolojik dormansi (uyku hali) gösterebilir. Özellikle büyük tohumlu çeşitlerin daha erken çimlenme eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Tohum dormansisi, 24 saat suda bekletilerek ya da caruncle'ın (tohumun baş kısmındaki yapı) çıkarılması ve kabukta küçük bir delik açılması gibi yöntemlerle kırılabilir (Ergin ve ark., 2022). Hintyağı bitkisinde çimlenme tipi epigealdir; yani çimlenme sırasında kotiledonlar (çenek yaprakları) toprak yüzeyine çıkar, fotosentetik işlev kazanır ve yeşil yapraklar hâline gelerek gelişim sürecine katkı sağlar (Salihu ve ark., 2014).

2.5.3. Hintyağı Bitkisinin Yağ ve Sekonder Metabolit Bileşenleri

Hintyağı bitkisinin tohumları steroller, risin, toksik bir protein (toksalbümin) olan Risinin alkaloidi, E vitamini içeren Oleum risini ve bazı fermentleri de içermektedir. Tohumlarında %35-55 civarında yağ bulunmaktadır. Ticari türlerde yağ oranı %40-60'lara yükselmektedir (Knight, 1979; Moshkin, 1986; Başalma ve Pashazadeh, 2011).

Hintyağı bitkisinin yapraklarından elde edilen uçucu yağlar, içerdiği biyoaktif bileşikler sayesinde doğal ilaç formülasyonlarında kullanılma potansiyeline sahiptir. Mboyazi ve ark. (2020), *R. communis* bitkisinin farklı coğrafi bölgelerden hasat edilmesinin, terapötik (tedavi edici) değeri olabilecek fitokimyasalların çeşitliliğini etkileyebileceğini belirtmişlerdir (Abdul ve ark., 2018). Nitekim bitkinin yaprak özütlerinde yapılan GC-MS analizleri sonucunda; oktadekanoik asit, n-heksadekanoik asit, 1-heksadekanol, trietil sitrat, 2-metil dietil ftalat, 3-oktadeken, -tuyon ve 1,8-sineol gibi başlıca bileşikler tespit edilmiştir (Zarai ve ark., 2012, Hussein ve ark., 2015).

Hintyağının toprak üstü aksamında üç farklı terpenoid (sekonder metabolit) ve bir tokoferol (E vitamini) türevi bileşiğe rastlanmıştır. Genel olarak bitkisel yağlar, üç karbonlu bir alkol olan gliserol ile 16 veya 18 karbonlu yağ asitlerinin esterleşmesiyle oluşan trigliserit yapısındaki moleküllerden meydana gelmektedir. Hintyağı bitkisinin yağı kimyasal yapısı bakımından oldukça özgün bir bitkisel yağdır. Bu özgünlük, temel olarak risinoleik asidin kimyasal özelliklerine -karboksil grubu, hidroksil grubu ve tekli doymamış bağ içeriği-dayanmaktadır (Erciyes ve ark., 1991; Mubofu, 2016; Yusuf ve ark., 2015). Söz konusu fonksiyonel gruplar, yağın fizikokimyasal özelliklerine katkı sağlamakta ve yapısal dayanıklılığını artırmaktadır.

Hintyağında yer alan başlıca yağ asitleri arasında risinoleik, oleik, stearik, palmitik, linoleik ve linolenik asitler bulunmaktadır. Bunlar içinde risinoleik asit, %75 ila %90 oranında toplam yağ asidi içeriğine sahip olmasıyla açık ara baskın bileşendir (Yusuf ve ark., 2015; Panhwar ve ark., 2016; Beruk ve ark., 2018; Nitbani ve ark., 2022). Bu derece yüksek düzeyde risinoleik asit içeren başka bir bitkisel yağ bulunmamakta; bu özellik de hintyağını diğer bitkisel yağlardan ayıran en belirgin kimyasal nitelik olarak öne çıkmaktadır.

Hint yağı, düşük miktarda doymuş ve çoklu doymamış yağ asitleri içermesi nedeniyle oksidatif stabilite açısından da avantajlıdır (Yusuf ve ark., 2015). Bununla birlikte, yağın bileşimi; kullanılan ekstraksiyon yöntemine, yetiştirildiği coğrafi bölgeye ve genotip özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik gösterebilmektedir. Yağ asidi profili açısından değerlendirildiğinde ise hint yağı, özellikle makademya fıstığı, palmiye çekirdeği, zeytin ve ayçiçeği yağlarıyla benzerlik göstermektedir (Nor Hayati ve ark., 2009; Sinanoglou ve ark., 2014; Yeboah ve ark., 2020). Ancak hintyağı tohumları yalnızca ekonomik değeri yüksek yağ bileşenlerini değil, aynı zamanda toksik bileşikler de içermektedir. Bu bileşikler arasında özellikle risin adlı protein ve risinin adlı alkaloid dikkat çekmektedir. Risin, bitkinin tüm aksamında düşük miktarda bulunsun da özellikle tohumlarında yüksek oranda yer almakta ve son derece güçlü bir toksin olarak bilinmektedir (Polito ve ark., 2019). Zehirlenme riski, genellikle hayvanların tohumları çiğnemesi veya kırılmış tohumları yutmasıyla ortaya çıkar. Bununla birlikte, bütün halde yutulan sağlam tohumlar, sindirim sisteminden genellikle risin salmadan geçebilir.

Ticari olarak satılan soğuk preslenmiş hintyağı, uygun dozlarda hem harici hem de dahili kullanım için toksik değildir. Ancak risin maruziyeti (ağız yoluyla ya da solunumla) birkaç saat içinde ciddi semptomlara neden olabilir. Bu semptomlar arasında mide mukozasında tahriş, şiddetli kusma, kanlı ishal, karın ağrısı, taşikardi, hipotansiyon, aşırı terleme, kollaps, kasılmalar ve birkaç gün içinde ölüme varan ciddi sonuçlar yer alabilir. Bu yüksek toksisite nedeniyle risinin biyolojik bir silah olarak kullanılma potansiyeli konusunda uluslararası düzeyde dikkat çekici endişeler mevcuttur (Balint, 1974; Bradbery ve ark., 2003; Nunez ve ark., 2017).

Tüm bu riskler göz önünde bulundurulduğunda, hintyağı bitkisinin süs bitkisi olarak yetiştirildiği alanlarda, özellikle iç ve dış mekân peyzaj düzenlemelerinde, çiçek salkımlarının erken dönemde bitkiden uzaklaştırılması önerilmektedir. Bu uygulama, tohum oluşumunu engelleyerek hem kazara zehirlenme riskini azaltmakta hem de çevresel güvenliği artırmaktadır.

3. FİZYOLOJİK VE ADAPTİF ANATOMİ

Hintyağı bitkisinin anatomik yapıları çevresel strese karşı yüksek esneklik gösterir. Özellikle stomaların konfigürasyonu ve tüy yapısı, su kaybını azaltmak için optimize edilmiştir. Kök ve gövdedeki lignifikasyon artışı, tuzluluk ve kuraklık koşullarında hayatta kalımı artıran özelliklerdendir. Bu nedenle, *R. communis* anatomik olarak hem yapısal dayanıklılığa hem de çevresel değişkenliğe yüksek tolerans gösteren bir bitki modeli sunar.

3.1. Anatomik özellikler

Çeşitli çevresel koşullara adaptasyon yeteneği gösteren hintyağı bitkisinin kök, gövde ve yaprak dokularında belirgin özellikler gözlemlenmektedir. Kazık kök sistemi, epidermis, korteks ve merkezi silindiri içeren tipik bir yapı sergiler. Korteks bölgesinde parankimatik hücreler ve endodermis tabakası bulunur. Merkezi silindirde ise belirgin bir perikambiyum ve iletim demetleri yer alır. Bu yapı, bitkinin su ve mineral alımında etkinliğini artırır. Bitkinin gövde kesitlerinde epidermis, korteks, iletim demetleri ve öz bölgesi belirgindir. Epidermis tabakası, kutikula ile kaplıdır ve bazı bölgelerde tüyler bulunabilir. Korteks, kolenkima ve parankima hücrelerinden oluşur. İletim demetleri, kollateral tiptedir ve ksilem ile floem dokularını içerir. Öz bölgesi geniş

parankimatik hücrelerle doludur. Yapraklar dorsiventral yapıdadır. Üst epidermis altında palizat parankiması, alt epidermis altında ise sünger parankiması bulunur. Stomalar genellikle alt epidermiste yer alır ve anizositik tiptedir. Bu yapı, gaz alışverişini ve su dengesini düzenlemede etkilidir (Salihu ve ark., 2014).

3.2. Fizyolojik Özellikler

Hintyağı bitkisi fizyolojik açıdan çeşitli adaptasyon mekanizmalarına sahip bir bitkidir. Bitki, C3 fotosentez yolunu kullanır. Geniş yaprak yüzeyi ve yoğun palizat parankiması, fotosentetik kapasiteyi artırır. Derin kök sistemi sayesinde suya erişimi yüksektir, bu da kurak koşullarda hayatta kalma şansını arttırır. Tohumlarında bulunan risin çoğu hayvan için ölümcül düzeyde toksiktir. Bu durum otçul hayvanlara karşı güçlü bir koruma sağlar (Audi ve ark., 2005) ve bitkinin savunma mekanizmasında rol oynar. Ayrıca, yaprak ve gövde dokularında çeşitli alkaloidler ve fenolik bileşikler sentezlenir. Hintyağı bitkisi, kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik streslere karşı dayanıklıdır. Bu tolerans, osmotik düzenleme ve antioksidan enzim aktiviteleri gibi fizyolojik mekanizmalarla sağlanır (Babita ve ark., 2010). Bunun yanında bazı çalışmalar, *R. communis*'in kök salgılarında bulunan bileşiklerin, çevresindeki bitkilerin çimlenmesini inhibe ettiğini göstermektedir (İslam ve ark., 2013; Parreno ve ark., 2020). Bu durum, bitkilerin salgıladığı maddelerle diğer bitkilerin büyümesini olumsuz etkilemesi anlamına gelen allelopati ile açıklanabilir (Leblebici ve ark., 2024).

Hintyağı bitkisinin geniş adaptasyon yeteneği, büyük ölçüde fenotipik varyasyonla ilişkilidir. Mısır, Hindistan, Çin ve Nijerya gibi ülkelerde yürütülen morfolojik varyasyon çalışmalarında; gövde rengi, yaprak büyüklüğü, lob sayısı, çiçek salkımı uzunluğu gibi karakterlere bağlı olarak çeşitli morfortiplerin tanımlandığı bildirilmiştir (Yamanura ve ark., 2024). Çok değişkenli istatistiksel analizler, iki ana morfortipin (cüce tip ve uzun boyu tip) varlığını göstermektedir. Bu morfortiplerin bazıları daha nemli ve tuzlu kıyı bölgelerine, bazıları ise yarı-kurak iç bölgelere uyum sağlamıştır. Dolayısıyla morfolojik karakterler, aynı zamanda ekolojik adaptasyonun da birer yansıması olarak değerlendirilmektedir (Delvadiya ve ark., 2024).

3.3.Sekonder Metabolit Üretimi ve Stres Koşullarına Dayanıklılıkla İlişkisi

Hintyağı bitkisi, çevresel stres koşullarına karşı geliştirdiği fizyolojik ve biyokimyasal savunma sistemlerinin bir parçası olarak çeşitli sekonder metabolitleri sentezleme kapasitesine sahiptir. Bu bileşikler, doğrudan büyüme ve gelişmede görev almaz; ancak bitkinin çevresel stres faktörlerine (kuraklık, tuzluluk, aşırı sıcaklık, ultraviyole, ağır metal, patojen saldırıları vb.) karşı tolerans geliştirmesinde temel rol oynar (Ribeiro ve ark., 2014; Wang ve ark., 2021; Sevgi ve Leblebici, 2023).

3.3.1. Sekonder Metabolitlerin Biyolojik Rolü

Bitkilerdeki sekonder metabolitler üç ana grupta sınıflandırılabilir: fenolik bileşikler, terpenoidler ve alkaloidler. *Ricinus communis*, bu grupların tamamında çeşitli bileşikler sentezleyebilen, kimyasal açıdan zengin bir türdür. Bitkinin özellikle yapraklarında, gövdesinde ve tohumlarında tanımlanmış başlıca sekonder bileşikler arasında flavonoidler, fenolik asitler, diterpenler (örneğin risinoleik asit türevleri), triterpenoidler, tokoferoller ve bazı alkaloidler (örneğin risinin) yer almaktadır. Bu bileşiklerin çoğu, bitkinin metabolik yanıtlarını düzenleyerek strese karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Örneğin fenolik bileşikler reaktif oksijen türlerini (ROS) etkisiz hâle getirerek oksidatif hasarın sınırlandırılmasında rol oynamaktadır. Flavonoidler, UV ışınlarına karşı doğal bir filtre görevi görürken, bazı alkaloidler ise antibakteriyel ve antifungal etki göstererek biyotik stres faktörlerine karşı savunmayı güçlendirir (Bennett ve Wallsgrove, 1994; Crozier ve ark., 2006).

3.3.2. Kuraklık ve Tuzluluk Stresi Altında Sekonder Metabolit Yanıtı

Kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşulları altında, hintyağı bitkisinde fenilpropanoid yoluna ait metabolitlerin (örneğin klorojenik asit, gallik asit) sentezinin arttığı gözlemlenmiştir (Kumar ve ark., 2023). Bu bileşikler, hücre zarının stabilitesini korur, protoplazmik viskoziteyi artırarak su kaybını yavaşlatır ve oksidatif stresi baskılar (Papazoglou ve ark., 2020).

Kuraklık stresi altında, aynı zamanda prolin, betain ve benzeri osmolitle birlikte bazı fenolik sekonder metabolitler birikir (Giri, 2014). Bu hem ozmotik

dengeleme sağlar hem de ROS detoksifikasyonuna katkıda bulunur. Tuz stresine maruz kalan bitkilerde, yaprak ve kök dokularında polifenol düzeylerinin arttığı; bunun da iyon toksisitesine karşı bir adaptasyon mekanizması olarak devreye girdiği gösterilmiştir (Huang ve ark., 2022; Sevgi ve Leblebici, 2025).

3.3.3. Isı ve UV Stresiyle İlişkili Yanıtlar

Yüksek sıcaklık ve UV radyasyonu, bitkide lipid peroksidasyonuna ve fotosentetik sistemin zarar görmesine yol açabilir. Bu durumlarda hintyağı bitkisi, özellikle flavonol ve antosiyanin bileşiklerini artırarak hücre düzeyinde bir koruma sağlar. Bu bileşikler hem UV ışığını absorbe ederek DNA ve proteinlerin zarar görmesini engeller, hem de güçlü antioksidan etkileriyle ROS birikimini sınırlar (Ribeiro ve ark., 2014).

3.3.4. Biyotik Stres Etmenlerine Karşı Savunma

Hintyağı tohumlarında doğal olarak bulunan risin, güçlü ribozom-inaktive edici bir proteindir ve aynı zamanda savunma alkaloidi olarak işlev görür. Bu protein, otoburların ya da patojen organizmaların saldırısına karşı koruma sağlayarak bitkinin üreme başarısını güvence altına alır. Ayrıca terpenoid yapılı bazı bileşiklerin antifungal özellik gösterdiği; yaprak ve kök yüzeyinde birikerek mantar ve bakteriyel enfeksiyonları sınırladığı bilinmektedir (Naz ve Bano, 2012; Rasmi ve ark., 2019).

3.3.5. Sekonder Metabolit Sentezinde Genetik ve Çevresel Etkileşim

Hintyağı bitkisinin sekonder metabolit üretimi, genetik yapısına bağlı olarak çeşitler arasında büyük farklılık gösterebilir. Bununla birlikte çevresel uyarılar, bu metabolitlerin sentezini doğrudan etkileyebilir. Örneğin, su stresine maruz bırakılan bitkilerde *PAL* (fenilalanin amonyak liyaz), *CHS* (kalkon sentaz) gibi enzimlerin gen ekspresyonunun arttığı, bunun da flavonoid ve fenolik sentezini hızlandığı bildirilmiştir (Lu ve ark., 2019).

4. EKOLOJİK YAYILIŞ VE ADAPTASYON

4.1. Ekolojik Yayılış

Hintyağı bitkisi, tropikal ve subtropikal iklim kuşaklarında doğal olarak yetişen, uygun ekolojik koşullar sağlandığında ılıman bölgelerde de başarıyla kültüre alınabilen bir türdür. Anavatanı olarak Afrika kıtası (özellikle Etiyopya ve çevresindeki bölgeler) gösterilmekle birlikte, geçmişten bugüne Asya, Amerika ve Akdeniz havzasına yayılmış ve bu bölgelerde doğal ya da yarı doğal popülasyonlar oluşturmuştur (Koutroubas ve ark., 1999). Türkiye'de özellikle Akdeniz ve Ege bölgelerinde rastlanır.

Ekofizyolojik olarak değerlendirildiğinde, bitkinin yayılışı büyük ölçüde, ılık yoğunluğu, toprak yapısı, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlere gösterdiği yüksek tolerans kapasitesiyle ilişkilidir. Fotosentetik aktivitesi, yüksek ışık şiddeti altında dahi sürdürülebilir; bu nedenle tam güneş alan alanlarda optimal verim alınır. C4 fotosentez tipinden farklı özellikler göstermesine rağmen, sıcak ve yarı kurak bölgelerde büyümesini sürdürebilmesi, etkin su kullanımı ve stomatal düzenleme yeteneğine bağlanmaktadır. Bununla birlikte temel gereksinimleri ise -özellikle çimlenme ve erken gelişme dönemlerinde- yüksek sıcaklık ve yeterli toprak nemidir (Başalma ve Pashazadeh, 2011).

Hintyağı bitkisinin genetik çeşitliliğinin yüksek olması ve çevresel stres koşullarına karşı morfo-fizyolojik esneklik gösterebilmesi; bitkinin doğal yayılış alanları dışında yetiştirildiği bölgelerde de kalıcı popülasyonlar oluşturmaya zemin hazırlar. Bu özellikler, bitkinin potansiyel istilacı türler arasında ele alınmasının gerekçesini oluşturur. Özellikle kullanılmayan tarım arazileri, yol kenarları ve kısmi doğal habitatlarda kendiliğinden yayılım sağlayabilmektedir.

4.2. Tarımsal Adaptasyon

Ricinus communis L, çeşitli toprak ve iklim koşullarında kolaylıkla yetiştirilebilen, çevreye uyum konusunda oldukça yüksek başarıya sahip bir yağ bitkisidir. Geniş ekolojik uyum becerisi, bitkinin morfolojik, anatomik ve fizyolojik düzeyde geliştirdiği çok yönlü tepkilerle doğrudan bağlantılıdır. Bu bağlamda bitki, özellikle yarı kurak alanlarda alternatif bir tarım ürünü olarak ön plana çıkmaktadır (Koutroubas ve ark., 1999).

4.2.1. İklim Koşullarına Adaptasyon

Sıcak iklim koşullarını seven hintyağı bitkisi, ancak geniş sıcaklık aralıklarında gelişimini sürdürebilen bir türdür. Optimal büyüme sıcaklığı 20-30 °C arası olmakla birlikte, 40 °Cyi aşan sıcaklıklarda dahi fotosentetik aktivitesini sürdürebilir. Yaprakların kutikula kalınlığı, stoma düzenlenmesi ve transpirasyon kontrolü gibi fizyolojik adaptasyonları sayesinde, bu yüksek ısı toleransı sağlanabilmektedir (Santos ve ark., 2017; Acosta-Navarrete ve ark., 2023). Ancak, tohumların çimlenme sürecinde düşük sıcaklıklara maruz kalması gelişimi olumsuz etkiler. 10 °C altı sıcaklıklar çimlenmeyi geciktirir ve homojen olmayan fide çıkışına neden olur (Wang ve ark., 2019). Dolayısıyla bu durum, bitkinin fenolojik gelişimi açısından önemli bir sınırlayıcı etken olarak ortaya çıkmaktadır.

4.2.2. Kuraklık ve Su Kısıtı Koşullarına Adaptasyon

Hintyağı bitkisi, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde yetiştirildiğinde, toprak altı su kaynaklarına erişmek için morfolojik olarak derin kazık kök sistemi geliştirme becerisine sahiptir. Bitkinin ana kökü 3-5 metreye kadar uzanabilirken, yan köklerin yatay yayılımı bir metreyi aşan bir alana yayılarak bitkinin suya ulaşma şansını artırır. Bu kök yapısı, bitkinin su stresine karşı daha dirençli olmasını sağlarken, aynı zamanda topraktaki çözünmüş mineral maddelere erişimini de kolaylaştırır (Lakshmamma ve ark., 2010; Landoni ve ark., 2023). Yaprak morfolojisi de su kaybını sınırlamaya yönelik adaptasyonlar içerir. Geniş ama kalın kutikulaya sahip yaprak yüzeyi, stoma yoğunluğunun azaltılması ve su stresi altında stoma kapanması gibi mekanizmalarla evapotranspirasyon düzenlenerek su kaybı kontrol altında tutulur. Ek olarak bazı varyetelerde, su stresi durumunda yaprakların büyümesi yavaşlar ve erken yaprak dökülmesi ile yüzey alanı küçültülerek fotosentetik kayıp en aza indirilmesi sağlanır (Babita ve ark., 2010; Parvathaneni ve ark., 2017; Papazoglou ve ark., 2020).

4.2.3. Toprak Koşullarına Uyum

Hintyağı bitkisi, çok çeşitli toprak tiplerinde gelişim gösterebilse de en iyi sonuçları, geçirgenliğin yüksek olduğu gevşek yapılı, organik maddeler açısından zengin ve hafif alkali topraklarda vermektedir. Ağır killi ve yüksek su

tutuma kapasitesi olan topraklarda kök çürümesi riski yüksektir. Bir miktar tuzlu veya hafif alkali topraklarda dayanıklılık göstermesi, bu bitkiyi marjinal arazilerde alternatif bir seçenek olarak öne çıkarmaktadır. Toprakta potasyum ve fosfor varlığı, özellikle yağ sentezi ve tohum gelişimi açısından önemlidir. Azot uygulaması ise bitkinin vejetatif gelişimini hızlandırırsa da fazla azot varlığı çiçeklenmeyi yavaşlatarak olgunlaşma dengesini bozabilmektedir (Xue ve ark., 2017).

Ricinus communis L., ağır metallerle kirlenmiş toprak koşullarında gelişimini sürdürebilme yeteneğine sahip bir bitki türüdür (Kammerbauer ve ark., 2000; Bauddh ve ark., 2015). Bu özelliği hem toprak toleransı hem de yüksek biyokütle üretimi ile ilişkilidir. Geniş yaprak yüzeyi ve hızlı büyüme becerisi sayesinde, çevresel stres etkenlerine karşı belirgin morfo-fizyolojik tepkiler gösterebilir ve bu özelliğiyle çevre kalitesinin değerlendirilmesinde bir tür "biyolojik sensör" işlevi sunabilmektedir. Toprakta ağır metalleri alma ve bünyelerinde biriktirme özelliğine sahip bitkiler akümülatör bitkiler olarak tanımlanmaktadır (Sevgi ve Leblebici, 2022). Söz konusu nitelikleri sayesinde akümülatör bitkilerden biri olan hintyağı, çevresel kirleticilerin tespiti ve kirlenmiş alanların iyileştirilmesine yönelik biyoremediasyon ve ekolojik restorasyon uygulamaları için potansiyel bir tür hâline gelmektedir (Boda ve ark., 2017; Huibo ve ark., 2023; Nour ve ark., 2023; Singh ve ark., 2025). Ancak hintyağı bitkisi, köklerinde kalıcı metal biriktirme eğiliminde ve translokasyon faktörlerinin çoğu zaman 1'in altında olması nedeniyle hiperakümülatör değildir. Yani çok yüksek düzeyde metal birikimi yapan bitkiler (örneğin *Thlaspi caerulescens* gibi) kadar etkili olmayabilir (Milner ve Kochian, 2008; Palanivel ve ark., 2020).

4.2.4. Işık ve Fotoperiyot Uyum Yeteneği

Hintyağı bitkisi güneş ışığını seven bir türdür ve bol güneş ışığı alan bölgelerde gelişim ve fotosentez etkinliği artar. Fotosentetik verim, C3 grubunda yer alan diğer bitkilerle kıyaslandığında oldukça yüksek düzeydedir (Dai ve ark., 1992). Gölge ortamlarda büyüme ve gelişme hızı azalır ve generatif organ oluşumu kısıtlanır. Fotoperiyoda duyarlılık seviyesi düşük olmakla birlikte, bitki ortamdaki sıcaklık ve nem şartlarına göre çiçeklenme zamanlamasını

ayarlayabilir ve bu özelliği, çeşitlerin farklı iklim kuşaklarına adaptasyonunu kolaylaştırmaktadır.

4.2.5. Morfolojik ve Fizyolojik Adaptasyon Özellikleri

Bitki, büyüme ortamına bağlı olarak morfolojik yapısını esnek biçimde değiştirme kapasitesine sahiptir. Örneğin; suyun daha az olduğu alanlarda daha kısa boylu, dallanması az, yaprak sayısı düşük bireyler görülürken; yüksek su alan ve besin açısından zengin topraklarda daha yüksek boylu, çok dallı ve daha geniş yapraklı formlar geliştirmektedir. Bitki boyunun 1-5 m arasında değişmesi, varyete özellikleri ile olduğu kadar çevre koşullarının etkisiyle de yakından ilişkilidir (Tadayyon ve ark., 2018; Tayfa Afshari ve ark., 2023).

Fizyolojik boyutta, stomal açıklıkların ayarlanması, bitkinin abiyotik strese karşı kendini koruma tepkilerinden biridir (Sausen ve Rosa, 2010). Su stresi durumunda transpirasyon oranı düşürülerek suyun daha verimli kullanılması sağlanmaktadır. Ayrıca yapraklardaki antosiyanin gibi pigmentlerin artması, UV ışınlarına karşı koruyucu bir rol üstlenmektedir. Fotosentetik pigmentlerin miktarı ve yoğunluğu, çevresel şartlara bağlı olarak dinamik olarak değişkenlik gösterebilir. Bitki, metabolik kaynaklarını su stresi varlığında hayatta kalmaya yönlendirmeye; optimum şartlarda ise hızlı bir şekilde büyüme ve çoğalmaya yönlendirme becerisine sahiptir.

Ricinus communis L.'nin başarılı bir şekilde ekosisteme ve tarıma uyum sağlayabilmesi sadece çevresel faktörlere dayanıklılığı ile değil, aynı zamanda bu çevresel faktörlere karşı geliştirdiği, kök yapısının farklılaşması, morfolojik esneklik, fotosentetik stabilite, su kullanım verimliliği ve çiçeklenme zamanlaması gibi farklı fizyolojik stratejilerle mümkün olmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, kuraklık ve iklim değişikliğine bağlı olarak gelişen tarımsal risklerin arttığı bugünlerde, alternatif yağ bitkisi olarak önemli bir potansiyel barındırmaktadır (Dai ve ark., 1992; Papazoglou ve ark., 2020).

5.Sonuç ve Değerlendirme

Euphorbiaceae familyasının monotipik cinslerinden biri olan hintyağı bitkisi, sistematik açısından dikkat çekici konumunun yanında, endüstriyel ve ekonomik özellikleri ile de öne çıkmaktadır. Ayrıca sahip olduğu morfolojik,

anatomik ve fizyolojik özellikleri sayesinde olumsuz çevre şartlarına uyum sağlayabilen bir tür olduğu da bilinmektedir.

Morfolojik olarak geniş yaprakları, güçlü gövde yapısı ve karakteristik meyve ve tohum morfolojisi; anatomik düzeyde ise iletim demetlerinin düzeni, yaprak parankiması ve kök yapısı çevresel streslere karşı toleransını artırmaktadır. Fizyolojik olarak kuraklık, tuzluluk gibi zorlu koşullarda fotosentezini sürdürebilmesi, sekonder metabolit üretimi ve derin kök sistemiyle çevresel faktörlere karşı direnç geliştirmesi, onu yarı-kurak alanlar için potansiyel bir tarımsal tür haline getirmiştir. Bu bağlamda, hintyağının botanik özelliklerinin detaylı bir şekilde ortaya konulması hem temel bilimsel bilgi üretimi hem de gelecekteki ıslah, biyoteknolojik uygulama ve sürdürülebilir tarım stratejileri açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, toksik bileşenlerinin dikkatli yönetimi ile bu türün biyoyakıt, ilaç ve kozmetik sanayiinde daha verimli ve güvenli şekilde kullanılabilmesinin önü açılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdul, W.M., Hajrah, N.H., Sabir, J.S., Al-Garni, S.M., Sabir, M.J., Kabli, S.A., ... & Bora, R.S. (2018). Therapeutic role of *Ricinus communis* L. and its bioactive compounds in disease prevention and treatment. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 11(3), 177-185.
- Abomughaid, M.M., Teibo, J.O., Akinfe, O.A., Adewolu, A.M., Teibo, T.K.A., Afifi, M., ... & Batiha, G.E.S. (2024). A phytochemical and pharmacological review of *Ricinus communis* L. *Discover Applied Sciences*, 6(6), 315.
- Acosta-Navarrete, M.S., Tigreros, J.A., Holgado-Apaza, L.A., Flores-Balderas, J.N., & Adame, J.M.B. (2023). Morphometric, weight, viability, and germination analysis of castor bean seeds (*Ricinus communis*) under two temperature and relative humidity conditions. *Agro Productividad*, 16(4), 81-90.
- AL-Hadeethi, B.A., & Al-Khafaji, N.M. (2021). Comparative anatomical study of *Ricinus communis* under salinity stress. *International Journal of Botany Studies*, 6(3), 50-56.
- Anonim, 2025a. <https://shrturl.app/Uigcc7> Erişim Tarihi: 11.06.2025.
- Anonim, 2025b. <https://shrturl.app/HCvICv> Erişim Tarihi: 25.06.2025.
- Anonim, 2025c. <https://shorturl.at/uWOs8> Erişim Tarihi: 25.06.2025.
- Anonim, 2025d. <https://shorturl.at/X9Bom> Erişim Tarihi: 25.06.2025.
- Anonim, 2025e. <https://shorturl.at/Cc3XE> Erişim Tarihi: 25.06.2025.
- Anonim, 2025f., <https://shorturl.at/9QRbb> Erişim Tarihi: 26.06.2025.
- Audi, J., Belson, M., Patel, M., Schier, J., & Osterloh, J. (2005). Ricin poisoning: a comprehensive review. *Jama*, 294(18), 2342-2351.
- Azadmard-Damirchi, S., Achachlouei, B.F., Alirezalu, K., Alirezalu, A., Hesari, J., & Emami, S. (2011). Physiological and medicinal properties of castor oil. *Book: Recent Progress in Medicinal Plants*, 323-37.
- Babita, M., Maheswari, M., Rao, L.M., Shanker, A.K., & Rao, D.G. (2010). Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinus communis* L.) hybrids. *Environmental and Experimental Botany*, 69(3), 243-249.

- Balint, G.A. (1974). Ricin: the toxic protein of castor oil seeds. *Toxicology*, 2(1), 77-102.
- Başalma, D., & Pashazadeh, M. (2011). Hintyağının (*Ricinus communis* L.) önemi, bitkisel özellikleri ve tarımı. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2), 57-67.
- Bauddh, K., Singh, K., Singh, B., & Singh, R.P. (2015). *Ricinus communis*: a robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil. *Ecological Engineering*, 84, 640-652.
- Bennett, R.N., & Wallsgrove, R.M. (1994). Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist*, 127(4), 617-633.
- Beruk, A.B., Abel, W.O., Assefa, A.T., & Sintayehu, S.H. (2018). Studies on Ethiopian castor seed (*Ricinus communis* L.): extraction and characterization of seed oil. *Journal of Natural Production Resource*, 4(2), 188-190. Doi: <http://dx.doi.org/10.30799/jnpr.064.18040204>.
- Boda, R.K., Majeti, N.V.P., & Suthari, S. (2017). *Ricinus communis* L. (castor bean) as a potential candidate for revegetating industrial waste contaminated sites in peri-urban Greater Hyderabad: remarks on seed oil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 19955-19964.
- Bradberry, S.M., Dickens, K.J., Rice, P., Griffiths, G.D., & Vale, J.A. (2003). Ricin poisoning. *Toxicological Reviews*, 22(1), 65-70.
- Chakrabarty, S. (2021). Castor (*Ricinus communis*): An Underutilized Oil Crop in the. *Agroecosystems: Very Complex Environmental Systems*, 61.
- Chaudhari, B.A., Patel, M.P., Patel, J.A., Makwana, R.R., Patel, A.M., & Patel, M.K. (2019). The characterization of castor (*Ricinus communis* L.) genotypes for morphological traits. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(5), 2482-2492.
- Chick, E. (1899). On the vascular system of the hypocotyl and embryo of *Ricinus communis* L. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 22, 652-672.
- Crozier, A., Clifford, M.N., & Ashihara, H. (2006). Plant secondary metabolites. *Occurrence, Structure and Role in the Human Diet*, Blackwell-Publishers.

- Da Silva, D.A., & Vieira, R.F. (2010). *Ricinus communis* L. (Euphorbiaceae): Morphological and physiological plasticity as keys to its success. *Brazilian Journal of Biology*, 70(2), 407-416.
- Dai, Z., Edwards, G.E., & Ku, M.S. (1992). Control of photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus communis* L. (castor bean) by leaf to air vapor pressure deficit. *Plant Physiology*, 99(4), 1426.
- Dastagir, G., & Hussain, F. (2010). Root anatomy of *Chrozophora tinctoria* (L.) raf and *Ricinus communis* L. (Euphorbiaceae). *Journal of Science and Technology*, 34(2), 7-14.
- Delvadiya, I., Ginoya, A.V., Madariya, R.B., & Dobariya, K.L. (2024). Morphological diversity in castor (*Ricinus communis* L.): A metroglyph analysis approach to reveal hidden patterns: metroglyph analysis in castor (*Ricinus communis* L.). *Annals of Arid Zone*, 63(1), 99-105.
- Dong, Y., Du, C., Yue, J., & Li, W. (2023). The complete chloroplast genome and phylogenetic analysis of *Acalypha hispida* Burm. f. (Euphorbiaceae), an ornamental and medicinal plant. *Mitochondrial DNA Part B*, 8(11), 1285-1289.
- Erciyes, A.T., Dandik, L., & Erkal, F.S. (1991). The decomposition of secondary esters of castor oil with fatty acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 68(9), 642-645.
- Ergin, N., Kaya, M.F., & Kaya, M.D. (2022). GA₃ acts as a germination promoter in wild castor bean (*Ricinus communis* L.). *Seed Science and Technology*, 50(2), 295-306.
- Giri, J. (2011). Glycinebetaine and abiotic stress tolerance in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 6(11), 1746-1751.
- Greenwood, J.S., & Bewley, J.D. (1982). Seed development in *Ricinus communis* (castor bean). I. Descriptive morphology. *Canadian Journal of Botany*, 60(9), 1751-1760.
- Guo, X.M., Zhao, X. M., Xu, K., Wang, X.R., Zhang, C.Y., & Dong-Fang, Y. (2020). Anatomy and microscopic observation of *Ricinus communis* seed structure. *Acta Agronomica Sinica*, 46(6): 914-923.
- Hocking, P.J. (1982). Accumulation and distribution of nutrients in fruits of castor bean (*Ricinus communis* L.). *Annals of Botany*, 49(1), 51-62.

- Hu, W., Chen, L., Qiu, X., Lu, H., Wei, J., Bai, Y., ... & Shen, G. (2016). Morphological, physiological and proteomic analyses provide insights into the improvement of castor bean productivity of a dwarf variety in comparing with a high-stalk variety. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1473.
- Huang, F., Jiang, Y., Zhang, S., Liu, S., Eh, T.J., Meng, F., & Lei, P. (2022). A comparative analysis on morphological and physiological characteristics between castor varieties (*Ricinus communis* L.) under salt stress. *Sustainability*, 14(16), 10032.
- Huibo, Z., Yong, Z., Rui, L., Guorui, L., Jianjun, D., Qi, W., ... & Fenglan, H. (2023). Analysis of the mechanism of *Ricinus communis* L. tolerance to Cd metal based on proteomics and metabolomics. *PloS One*, 18(3), e0272750.
- Hussein, A.O., Hameed, I.H., Jasim, H., & Kareem, M.A. (2015). Determination of alkaloid compounds of *Ricinus communis* by using gas chromatography-mass spectroscopy (GC-MS). *Journal of Medicinal Plants Research*, 9(10), 349-359.
- Hussen, K.W. 2021. Genetic diversity assessment and biological description of castor bean crop (*Ricinus communis* L.). *International Journal of Current Research and Academic Review*, 9(01), 59-69. Doi: <https://doi.org/10.20546/ijcrar.2021.901.005>.
- Hussen, K.W. (2022). Review on Reproductive Biology of Castor bean (*Ricinus communis* L.). *Journal of Ecology and Natural Resources*, 6(1), 000268.
- İslam, A.M., & Kato-Noguchi, H. (2013). Allelopathic prospective of *Ricinus communis* and *Jatropha curcas* for bio-control of weeds. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 63(8), 731-739.
- Kammerbauer, J., & Dick, T. (2000). Monitoring of urban traffic emissions using some physiological indicators in *Ricinus communis* L. plants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39, 161-166.
- Knight, B. (1979). Ricin-a potent homicidal poison. *British Medical Journal*, 1(6159), 350-351.
- Koutroubas, S.D., Papakosta, D.K., & Doitsinis, A. (1999). Adaptation and yielding ability of castor plant (*Ricinus communis* L.) genotypes in a

- Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*, 11(3-4), 227-237.
- Kumar, K., Debnath, P., Singh, S., & Kumar, N. (2023). An overview of plant phenolics and their involvement in abiotic stress tolerance. *Stresses*, 3(3), 570-585.
- Kumaraswamy, H.H., Dinesh Kumar, V., Lavanya, C., Ushakiran, B., Senthilvel, S., Sujatha, M., Bhavani, K.B.D., Konda, A.K., Lakshmidhevi, G., Ashfaq, M.D., Kumar, B.S., Reddy, P.S.S., & Kumaret, C.A. (2022). Biotechnological Approaches for Genetic Improvement of Castor Bean (*Ricinus communis* L.), Gosal, S.S., Wani, S.H. (Edt.). *Accelerated Plant Breeding*, 11, 359-418, *Volume 4: Oil Crops. Springer Nature*.
- Lakshmmamma, P., Lakshminarayana, M., Prayaga, L., Alivelu, K., & Lavanya, C. (2009). Effect of defoliation on seed yield of castor (*Ricinus communis*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 79(8), 620.
- Lakshmmamma, P., Prayaga, L., & Sarada, C. (2010). Evaluation of castor (*Ricinus communis* L.) germplasm for water use efficiency (WUE) and root characters. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*, 23(03), 276-279.
- Landoni, M., Bertagnon, G., Ghidoli, M., Cassani, E., Adani, F., & Pilu, R. (2023). Opportunities and challenges of castor bean (*Ricinus communis* L.) genetic improvement. *Agronomy*, 13(8), 2076.
- Lavanya, C., Vishnuvardhan Reddy, A., Dutta, B., & Bandopadhyay, R. (2019). Classical genetics, cytogenetics, and traditional breeding in castor bean. *The Castor Bean Genome* (33-65). Cham: Springer International Publishing.
- Leblebici, S., Başaran, U., & Gülümser, E. (2024). Yem şalgamının mürdümük tohumlarının çimlenme ve fide gelişimi üzerinde allelopatik etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(4), 1761-1767.
- Lu, J., Shi, Y., Li, W., Chen, S., Wang, Y., He, X., & Yin, X. (2019). RcPAL, a key gene in lignin biosynthesis in *Ricinus communis* L. *BMC Plant Biology*, 19(1), 181.

- Mboyazi, S.N., Nqotheni, M.I., Maliehe, T.S., & Shandu, J.S. (2020). In vitro antibacterial and in silico toxicity properties of phytocompounds from *Ricinus communis* leaf extract. *Pharmacognosy Journal*, 12(5), 977-983.
- Milani, M., & de Medeiros Nbrig, M.B. (2013). Castor breeding. *Plant Breeding from Laboratories to Fields*, 239-254.
- Milner, M.J., & Kochian, L.V. (2008). Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. *Annals of Botany*, 102(1), 3-13.
- Moshkin, V.A., & Dvoryadkina, A.G. (1986). Cytology and genetics of qualitative characteristics. *Castor. Delhi: Amerind Publication*, 125-132.
- Mubofu, E.B. (2016). Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials. *Sustainable Chemical Processes*, 4, 1-12.
- Mutlu, H., & Meier, M.A.R. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(1), 10-30.
- Naik, B. (2019). Botanical descriptions of castor bean. *The Castor Bean Genome* (1-14). Cham: Springer International Publishing.
- Naz, R., & Bano, A. (2012). Antimicrobial potential of *Ricinus communis* leaf extracts in different solvents against pathogenic bacterial and fungal strains. *Asian Pacific journal of Tropical Biomedicine*, 2(12), 944-947.
- Nitbani, F.O., Tjitda, P.J.P., Wogo, H.E., & Detha, A.I.R. (2022). Preparation of ricinoleic acid from castor oil: a review. *Journal of Oleo Science*, 71(6), 781-793.
- Nor Hayati, I., Che Man, Y.B., Tan, C.P., & Nor Aini, I. (2009). Physicochemical characteristics of soybean oil, palm kernel olein, and their binary blends. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(1), 152-161.
- Nour, I.H., Alhadead, K., Ellmouni, F.Y., Badr, R., Saad, T.I., El-Banhawy, A., & Abdel Rahman, S.M. (2023). Morphological, anatomical and chemical characterization of *Ricinus communis* L. (Euphorbiaceae). *Agronomy*, 13(4), 985.

- Nunez, O.F.L., Pizon, A.F., & Tamama, K. (2017). Ricin poisoning after oral ingestion of castor beans: a case report and review of the literature and laboratory testing. *The Journal of Emergency Medicine*, 53(5), e67-e71.
- Ogunniyi, D.S. (2006). Castor oil: a vital industrial raw material. *Bioresource Technology*, 97(9), 1086-1091.
- Oliveira, S.S.D., Manjavachi, M.K.D.P., Zeffa, D.M., Sartori, M.M.P., & Zanotto, M.D. (2019). Morphological characterization and selection of castor bean accessions for mechanized production. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 49, e56749.
- Palanivel, T.M., Pracejus, B., & Victor, R. (2020). Phytoremediation potential of castor (*Ricinus communis* L.) in the soils of the abandoned copper mine in Northern Oman: implications for arid regions. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(14), 17359-17369.
- Panhwar, T., Mahesar, S.A., Mahesar, A.W., Kandhro, A.A., Talpur, F.N., Laghari, Z.H., Chang, A.S., & Hussain Sherazi, S.T. (2016). Characteristics and composition of a high oil yielding castor variety from Pakistan. *Journal of Oleo Science*, 65(6), 471-476. Doi: <http://dx.doi.org/10.5650/jos.ess15208>. PMID:27250560.
- Papazoglou, E.G., Alexopoulou, E., Papadopoulos, G.K., & Economou-Antonaka, G. (2020). Tolerance to drought and water stress resistance mechanism of castor bean. *Agronomy*, 10(10), 1580.
- Parreno, J., Cempron, B., Bucog, N., Pepito, M., & Zamora, C. (2020). Allelopathic potential of castor plant (*Ricinus communis* L.) aqueous extracts on germination on selected crop species. *International Research Journal of Science and Technology*, 1, 120-125.
- Parvathaneni, L., Prayaga, L., & Karusala, A. (2017). Selection of castor germplasm with important traits for drought tolerance under field conditions. *Indian Journal of Plant Physiology*, 22(3), 295-303.
- Peña-Uribe, G.D.J., Vázquez-Chun, C., Valdez-Cepeda, R.D., Armendáriz-Erives, S., & López-Santos, A. (2022). Physiological response of three wild castor bean (*Ricinus communis* L.) ecotypes exposed to different substrate moisture levels. *Agro Productividad*, 15(1), 111-119.

- Polito, L., Bortolotti, M., Battelli, M.G., Calafato, G., & Bolognesi, A. (2019). Ricin: An ancient story for a timeless plant toxin. *Toxins*, 11(6), 324.
- Ramanjaneyulu, A.V., Reddy, A.V., & Madhavi, A. (2013). The impact of sowing date and irrigation regime on castor (*Ricinus communis* L.) seed yield, oil quality characteristics and fatty acid composition during post rainy season in South India. *Industrial Crops and Products*, 44, 25-31.
- Ramprasad, R., & Bandopadhyay, R. (2010). Future of *Ricinus communis* after completion of the draft genome sequence. *Current Science*, 99(10), 1316-1318.
- Rashmi, Pathak, D.V., & Kumar, R. (2019). Effect of *Ricinus communis* L on microorganisms: advantages and disadvantages. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(4).
- Ribeiro, P.R., Fernandez, L.G., de Castro, R.D., Ligterink, W., & Hilhorst, H.W. (2014). Physiological and biochemical responses of *Ricinus communis* seedlings to different temperatures: a metabolomics approach. *BMC Plant Biology*, 14(1), 223.
- Rodrigues, D.A., de Fátima Sales, J., Vasconcelos Filho, S.C., Rodrigues, A.A., Teles, E.M.G., Costa, A.C., Reis, E.L., Silva, T.A.C., & Müller, C. (2020). Bioindicator potential of *Ricinus communis* to simulated rainfall containing potassium fluoride. *PeerJ*, 8, e9445.
- Saadaoui, E., Martín, J.J., Tlili, N., & Cervantes, E. (2017). Castor bean (*Ricinus communis* L.) Diversity, seed oil and uses. Ahmad, P. (Edt). *Oilseed Crops: Yield and Adaptations under Environmental Stress*, 19-33.
- Salihu, B.Z., Falusi, O.A., Adepoju, A.O., Arolu, I.W., Daudu, O.Y., Abejide, D.R., & Oke, C.O. (2019). Assessment of genetic diversity of promising castor bean (*Ricinus communis* L.) genotypes in Nigeria. *Notulae Scientia Biologicae*, 11(3), 467-474.
- Salihu, B.Z., Gana, A.K., & Apuyor, B.O. (2014). Castor oil plant (*Ricinus communis* L.): Botany, ecology and uses. *International Journal of Science and Research*, 3(5), 1333-1341.
- Santos, C.M.D., Endres, L., Ferreira, V.M., Silva, J.V., Rolim, E.V., & Wanderley Filho, H.C. (2017). Photosynthetic capacity and water use efficiency in

- Ricinus communis* (L.) under drought stress in semi-humid and semi-arid areas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89(04), 3015-3029.
- Sausen, T.L., & Rosa, L.M.G. (2010). Growth and carbon assimilation limitations in *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) under soil water stress conditions. *Acta Botanica Brasilica*, 24, 648-654.
- Sevgi, K., & Leblebici, S. (2022). Bitkilerde ağır metal stresine verilen fizyolojik ve moleküler yanıtlar. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 7(4), 528-536.
- Sevgi, B., & Leblebici, S. (2023). Tuz stresinin bitkiler üzerindeki etkileri ve geliştirilen tolerans mekanizmaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(3), 1498-1516.
- Sevgi, B., & Leblebici, S. (2025). Exogenous sucrose alleviates salt stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) and canola (*Brassica napus* L.) by modulating osmotic adjustment and antioxidant defense system. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 31(3), 405-418.
- Scarpa, A., & Guerici, A. (1982). Various uses of the castor oil plant (*Ricinus communis* L.) a review. *Journal of Ethnopharmacology*, 5(2), 117-137.
- Sinanoglou, V.J., Kokkotou, K., Fotakis, C., Strati, I., Proestos, C., & Zoumpoulakis, P. (2014). Monitoring the quality of γ -irradiated macadamia nuts based on lipid profile analysis and Chemometrics. Traceability models of irradiated samples. *Food Research International*, 60, 38-47.
- Singh, S., Srivastava, R., & Bauddh, K. (2025). *Ricinus communis*: An Abiotic Stress-Tolerant Crop for Reclamation of Wasteland Reclamation. In *Ricinus Communis: A Climate Resilient Commercial Crop for Sustainable Environment* (135-153). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Tadayyon, A., Nikneshan, P., & Pessarakli, M. (2018). Effects of drought stress on concentration of macro-and micro-nutrients in Castor (*Ricinus communis* L.) plant. *Journal of Plant Nutrition*, 41(3), 304-310.
- Tayfa Afshari, H., Mirshekari, B., Hasanzadeh Ghorttapeh, A., Farahvash, F., & Yarnia, M. (2023). Effect of use of biological fertilizers and superabsorbents on the agronomic characteristics of castor plant (*Ricinus*

- communis* L.) under water deficit stress conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 16(3), 853-869.
- Vasco-Leal, J. F. V., Cuellar-Nuñez, L., Vivanco-Vargas, M., Solís-Lozano, J. A., Díaz-Calzada, M.E., & Méndez-Gallegos, S.D.J. (2022). Agribusiness potential of castor oil plant (*Ricinus communis* L.) in Mexico. *Agro Productividad*, 15(5), 143-152.
- Wang, X., Li, M., Liu, X., Zhang, L., Duan, Q., & Zhang, J. (2019). Quantitative proteomic analysis of castor (*Ricinus communis* L.) seeds during early imbibition provided novel insights into cold stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(2), 355.
- Wang, Y., Liu, J., Yang, F., Zhou, W., Mao, S., Lin, J., & Yan, X. (2021). Untargeted LC-MS-based metabolomics revealed specific metabolic changes in cotyledons and roots of *Ricinus communis* during early seedling establishment under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, 108-118.
- Webster, G.L. (1994). Synopsis of the genera and suprageneric taxa of Euphorbiaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 33-144.
- Weiss, E.A. (1983). Castor, *Oilseed Crops*, 31-99. Wendel, J.F. (Edt.). New York: Longman Inc.
- Wurdack, K.J., Hoffmann, P., & Chase, M.W. (2005). Molecular phylogenetic analysis of uniovulate Euphorbiaceae (Euphorbiaceae sensu stricto) using plastid *rbcL* and *trnL-F* DNA sequences. *American Journal of Botany*, 92(8), 1397-1420.
- Xue, X., Mai, W., Zhao, Z., Zhang, K., & Tian, C. (2017). Optimized nitrogen fertilizer application enhances absorption of soil nitrogen and yield of castor with drip irrigation under mulch film. *Industrial Crops and Products*, 95, 156-162.
- Yamanura, R., Sangannavar, P.A., & Boraiah, B. (2024). Exploring agromorphological variation, genetic diversity, and trait associations in castor (*Ricinus communis* L.) genotypes. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 15(2), 487-495.
- Yeboah, A., Ying, S., Lu, J., Xie, Y., Amoanimaa-Dede, H., Boateng, K. G. A., ... & Yin, X. (2020). Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the

chemical composition and physicochemical properties. *Food Science and Technology*, 41, 399-413.

Yusuf, A.K., Mamza, P.A.P., Ahmed, A.S., & Agunwa, U. (2015). Extraction and characterization of castor seed oil from wild *Ricinus communis* Linn. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 4(5), 1392-1404.

Zarai, Z., Chobba, I.B., Mansour, R.B., Békir, A., Gharsallah, N., & Kadri, A. (2012). Essential oil of the leaves of *Ricinus communis* L.: in vitro cytotoxicity and antimicrobial properties. *Lipids in Health and Disease*, 11, 1-7.

BÖLÜM 11

BRASSICACEAE FAMILİYASINDA YER ALAN BAZI MİNÖR SEBZELER

Doç. Dr. Gamze KAYA¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16372451>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Bilecik, Türkiye. gamze.kaya@bilecik.edu.tr,
Orcid ID: 0000-0002-9815-2672

GİRİŞ

Sebzeler, insanların günlük beslenme düzeninde önemli bir yer almaktadır. Gerek kültüre alınmış türleri gerekse yabani türleriyle çok büyük form ve genetik çeşitliliğe sahiptirler. Genel olarak, dünyanın her yerinde çoğunlukla ana yemek olarak kullanılan sebzelerden aynı zamanda ana yemeğin tamamlayıcısı niteliğindeki salatalar, mezeler ve soslar da yapılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde insanlar beslenmelerinde neredeyse her gün hatta her öğünde sebze tüketmektedir. Sebzelerin tüketimdeki popülaritesinde, içerdikleri yüksek besin değerleri de önemli bir rol oynamaktadır (Suhrccke ve ark., 2006; Abu ve ark., 2021).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), sağlıklı beslenmeyi temel insan haklarından biri olarak değerlendirmektedir. Sebzelerin vücut için gerekli besinleri, vitamin ve minerallerin alınmasında çok önemli bir rol oynaması ve bunu yanında birçok hastalığın önlenmesinde ve tedavi edici etkisinin de bulunması besin değerini yükseltmektedir (Pallazola ve ark., 2019). Vücuttaki alkali rezervlerini korumanın yanı sıra, sebzeler karbonhidrat, protein, enerji, su ve lif kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Slavin ve Llyod, 2012; Abu ve ark., 2021). Özellikle, uygun bir diyetle, sebzeler vücudun metabolik enerji talebini destekleyen yeterli miktarlarda makro besin maddelerini ve fizyolojik süreçlerin düzgün işleyebilmesi için gerekli olan mikro besinlere (biyoaktif bileşikler, sekonder metabolitler, fenolik bileşikler) de sahiptirler (Ciriello ver ark., 2024).

Sebze üretimi ve ticareti aynı zamanda büyük istihdam ve gelir kaynağı oluşturmaktadır. Metrekare başına net gelir, buğday, arpa ve mısır gibi temel ürünlerden elde edilen gelirin yaklaşık olarak 5-7 katına ulaşmaktadır. Buna ek olarak, nispeten küçük alanlarda büyük miktarlarda ürün veren sebze türlerinin üretimi özellikle gençler, kadınlar ve marjinal gruplara cazip gelerek istihdam yaratmaktadır.

Dünyada 2023 yılı toplam sebze üretim miktarı 1.2 milyar tona ulaşırken, aynı yıl içerisinde 105 milyar dolar sebze ihracatı ve 107 milyar dolar sebze ithalatı gerçekleşmiştir (FAO, 2025a). Türkiye’de 2024 yılı toplam sebze üretim miktarı bir önceki yıla göre 1.2 milyon ton artarak yaklaşık 33 milyon ton, ekim alanı ise 2023 yılına göre 310 bin dekar artarak yaklaşık olarak 8 milyon dekara ulaşmıştır (TÜİK, 2025). 2022 yılı dünya sebze ihracatı yaklaşık

olarak 108 milyon ton, ithalatı ise 150 milyon ton iken, Türkiye sebze ihracatı yaklaşık olarak 4 milyon ton ve ithalatı ise 440 bin ton olarak gerçekleşmiştir (FAO, 2025b). Ayrıca, ülkemiz dünya sebze üretiminde de önemli bir yere sahip olup, toplam üretim bakımından 27 milyon ton ile Çin, Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri'nden sonra 4. sırada yer almaktadır. Ekim alanları bakımından ise ilk sıralarda yer alan Çin, Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerden sonra oldukça gerilerde yer alan Türkiye, 653.553 ha toplam sebze ekim alanı ile 12. sırada gelmektedir (FAO, 2025c).

Dünyada sebze olarak değerlendirilen yaklaşık 10.000 bitki türü bulunmakta ve bunlardan ancak 50 bitki türünün ticari açıdan önemi bulunmaktadır. Üreticiler tarafından yaygın olarak bilinen ve yetiştiriciliği yapılan sebzelerin dışında, üretimi daha az miktarlarda yapılan ve yaygın olarak üretilmeyen sebzeler “yerel sebzeler” ya da “minör sebzeler” olarak adlandırılmakta ve bu grupta pek çok sebze türü bulunmaktadır (Kaya ve Özdemir, 2025). Minör sebzeler grubunda yer alan birçok türün ise yeşil yaprakları tüketilmekte, yoğun lezzet, doku ve aroma özellikleriyle karakterize edilmektedir (Sharma ve ark., 2023). Kısa vejetasyon süreleri ve besin açısından yoğun özellikleri nedeniyle mevcut diyet kültüründe popüler hale gelen minör sebzeler, ilk olarak 1980'lerin başında modern mutfaklarda Kaliforniyalı şefler tarafından kullanılmış ve “Sebze konfetisi” olarak adlandırılmıştır (Pinto ve ark., 2015). Maydanoz, hardal, pazı, kereviz, lahanası, kişniş, frenk maydanozu, rezene, tere, fesleğen, pancar, roka ve kuzukulağı en popüler minör sebze türleri olarak sınıflandırılmıştır (Xiao ve ark., 2012).

Dünyada ve Türkiye’de yetiştirilen birçok minör sebze türü bulunmakta ve en çok yetiştirilen türler *Amaranthaceae* (pancar, pazı, kinoa ve ıspanak), *Brassicaceae* (savoy lahanası, Çin lahanası, su teresi, kara lahanası, şalgam, pak choi, alabaş, tatsoi, wasabi, mibuna, mizuna, komatsuna ve hardal), *Amarillydaceae* (frenk soğanı), *Asteraceae* (hindiba), *Apiaceae* (kişniş, rezene, maydanoz) ve *Lamiaceae* (nane ve fesleğen) familyalarında bulunmaktadır (Di Gioia ve ark., 2017; Shibaeva ve ark., 2022; Sharma ve ark., 2022). Ancak, kolay yetişmeleri, zengin besin içeriği, canlı renk ve tatlara ve önemli piyasa değerine sahip olması nedeniyle ticari minör sebze türlerinin çoğu *Brassicaceae* familyasındaki yaprağı yenen sebzelerdir.

Brassicaceae familyasındaki sebzeler, dünya çapında en yaygın olarak tüketilen sebzelerden olup, kanser, kardiyovasküler hastalık ve diğer dejeneratif

hastalıkların görülme sıklığını azaltmada sağlığa yararlı özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir (Manchali ve ark., 2012). *Brassicaceae* sebzelerinin sağlığın iyileştirilmesine katkısı, genellikle askorbik asit, karotenoidler, tokoferoller ve fenolik bileşiklerin yanı sıra glukozinolatlar gibi antioksidan kapasiteye sahip fitokimyasalları yüksek düzeyde biriktirmelerinden kaynaklanmaktadır. Yemeklere hem görsel ilgi hem de keskin tatlar sağlamalarının yanında genellikle salatalarda, çorbalarda ve sandviçlerin içerisinde bir bileşen olarak taze servis edilmekte veya yenilebilir garnitür olarak kullanılmaktadırlar (Sun ve ark., 2013; Xiao ve ark., 2019).

Minör sebzelerin küçük boyutlarına rağmen (2-20 cm), besin (vitaminler, mineraller, lifler ve fitokimyasallar gibi), renk ve lezzet açısından oldukça zengin olmaları, yiyecek ve içecek endüstrisinin de büyük bir potansiyel kazandırmaktadır. Belirli bir ürünün olgun muadili ile karşılaştırıldığında, fitokimyasal içeriği bakımından yüksek konsantrasyonlara sahip olduklarından, “süper gıdalar” olarak atfedilmektedir. Yapılan çalışmalarda turp (*Raphanus raphanistrum* subsp. *sativus*) ve kırmızı lahana (*Brassica oleracea* L.) yeşilliklerinde olgun muadilleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek oranda fitokimyasal ve mineral konsantrasyonları tespit edilmiştir (Hanlon ve Barnes, 2011; Huang ve ark., 2016).

Minör sebzelerin besin değeri konusunda tüketici talebi ve farkındalığı arttıkça, kullanılabilirlik restoran masasının ötesine geçmektedir. Minör sebzeler yerel çiftçi pazarlarında, özel gıda mağazalarında ve büyük perakende marketlerin ürün reyonlarında satışa sunulmaya başlanmıştır. Artan sayıda tüketici ve onlara hizmet vermek için gelişen endüstri, piyasada bulunan minör sebzelerin doğru beslenme bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Her ne kadar ekim alanları ve üretim miktarları az olsa da bu çalışmada *Brassicaceae* familyasında yer alan bazı minör sebzelerin yetiştiriciliği değerlendirilmiştir.

1. YETİŞTİRME TEKNİKLERİ

Minör sebze yetiştiriciliği yapan üreticilerin yüksek kaliteli ürün üretmeleri, doğru müşterileri hedeflemeleri, üretim ve pazarlama süreçlerini başarıyla yönetmeleri gerekmektedir. Minör sebze yetiştirme ekonomisinde pazar talebi, üretim maliyetleri, dağıtım yöntemleri ve fiyat gibi değişkenler önemli rol oynamaktadır. Minör sebzelerin üretim maliyetinin büyük bir

kısmını tohumlar, yetiştirme ortamları, tepsiler veya kaplar, aydınlatma ekipmanları, su, elektrik, işçilik, mücadele yöntemi giderleri ve paketleme masrafları gibi girdiler oluşturmaktadır (Singh ve ark., 2024). Minör sebzeler ekonomik potansiyelleri nedeniyle geleneksel tarım ürünlerinden birim alandan daha fazla gelir getirme kapasitesine sahiptir. Üst düzey restoranlar ve özel gıda mağazaları genellikle üstün kaliteli minör sebzeler için ekstra ücret talep etmekte bu da üreticilere finansal olarak fayda sağlamaktadır. Gelir marjları bölgesel koşullara göre değişmekle birlikte, hızlı gelir artışı, düzenli hasat ve hızlı büyüme döngüsü ile elde edilebilmektedir (Gentry, 2019).

Brassicaceae familyasında yer alan minör sebzeler çoğunlukla tohumdan yetiştirilen bitkilerin genç filizleri veya fideleridir. Bu filizlerde iki kotiledon yaprakla birlikte ilk gerçek yaprak çifti bulunmakta ve kısmen genişlemiştir. Genellikle ekimden sonraki 7-21 gün içinde köksüz olarak hasat edilmektedirler (Xiao ve ark., 2012). Ancak, minör sebzeler filizlerden farklıdır. Filizler, kökleriyle birlikte yenen çimlenmiş veya kısmen çimlenmiş tohumlardır. Filizlerde kullanılan tohumluk yoğunluğu yüksektir ve optimum sıcaklık, yüksek nem ve düşük ışık koşullarında yetiştirilmektedir (Mir ve ark., 2017). Üretim ölçeğine bağlı olarak minör sebzeler ise çeşitli ortamlarda (açıkta ve örtü altı) ve yetiştirme sistemlerinde (toprak, topraksız) direkt tohumdan ya da fideden üretilmektedir. Hem mikro ölçekte (evlerin balkon, saksı, hobi bahçeleri vb.) hem de büyük ölçekli ticari üretim yapılabilir. Ayrıca, geleneksel olan açıkta üretime kıyasla örtü altı yetiştiriciliğinde daha fazla ve daha stabil bir verim ile yıl boyunca üretim yapılabilir (Shamshiri ve ark., 2018). Sıcaklık ve ışığın kontrollü olarak kullanıldığı örtü altı yetiştiriciliğinde ise üretim topraklı ya da topraksız olarak gerçekleştirilmektedir. Topraksız yetiştirme sisteminde, turba yosunu, hindistan cevizi lifi, kenevir matı, kaya yünü veya diğer inert gözenekli malzemeler gibi substratlar kullanılmaktadır (Di Gioia ve ark., 2017; Thuong ve Minh, 2020). Bu sistemde substratlar yalnızca inert bir destek olmaktan ziyade bir besin kaynağı olarak da işlev görebilmektedir (Thuong ve Minh, 2020). Hidroponik sistemdeki yetiştiricilikte, geleneksel tarımdan daha az su ve dikey tarım yöntemleri kullanılarak yetiştiricilik yapılmaktadır. Ayrıca geleneksel yöntemlere kıyasla, hidroponik üretim sisteminde 5-20 kata kadar su tasarrufu sağlanmakta ve yaklaşık olarak %75'e kadar daha az alan gerektirmektedir (AlShrouf, 2017).

2. *Brassicaceae* FAMILİYASINDAKİ BAZI MINÖR SEBZELER

Minör sebzelere olan talep, düzenli olarak tüketildiğinde sağlık açısından önemli faydalarının olması nedeniyle giderek artmaktadır. Minör sebze pazarının ağırlıklı olarak lüks marketler ve restoran şefleri olduğu söylenebilir. Bunun yanında, bünyesinde bulunan bazı bileşenler nedeniyle cilt bakımı, şampuan ve kozmetik ürünlerinde kullanılmaktadır. Özellikle *Brassicaceae* familyasındaki minör sebzeler baharatlıdan tatlıya uzanan benzersiz aromaları ve canlı renkleriyle bir yemeğin estetik karakterini yükseltmektedir. Genellikle salatalar, sandviçler ve çorbalarla birlikte servis edilmekte ve ayrıca pizzalarda, omletler vb. garnitür ve sos olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır (Murphy ve ark., 2010).

Minör sebzeler konusunda sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Ancak minör sebze pazarının, sayılan bu nedenlerle ve özellikle kapalı alanda yetiştiricilik tekniğindeki ilerlemelere bağlı olarak yetiştirme teknikleri, pazarlanması ve ekonomik analizi gibi konularda çalışmalar da yapıldıkça önümüzdeki dönemde büyük ölçüde genişleyeceği tahmin edilmektedir (Paraschivu ve ark., 2021).

Tablo 1. Dünyada ticari olarak yetiştirilen ve *Brassicaceae* familyasında yer alan bazı minör sebzeler

Roka	<i>Eruca sativa</i> Mill.
Brokoli	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>italica</i>
Brüksel lahanası	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>gemmifera</i>
Çin lahanası	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>pekinensis</i>
Beyaz baş lahana (Cibes)	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>capitata f. alba</i>
Kırmızı lahana	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>capitata f. rubra</i>
Savoy lahanası	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>capitata f. sabauda</i>
Karnabahar	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>botrytis</i>
Yaprak lahana (Kale)	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>
Alabaş	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>gongylodes</i>
Komatsuna	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>perviridis</i>
Mibuna	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>nipposinica</i>
Mizuna	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>japonica</i>
Misome	<i>Brassica campestris</i> L. var. <i>narinosa</i>
Japon hardalı	<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern.
Pak choi	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>chinensis</i>
Turp	<i>Raphanus sativus</i> L.
Rapini	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>ruvo</i>

Rutabaga	<i>Brassica napus</i> L. var. <i>napobrassica</i>
Tatsoi	<i>Brassica narinosa</i> L. var. <i>rosularis</i>
Şalgam	<i>Brassica rapa</i> L. var. <i>rapa</i>
Wasabi	<i>Wasabia japonica</i> Matsum.
Su teresi	<i>Nasturtium officinale</i> L.

Kaynak: Xiao ve ark. (2016)

Brassicaceae familyasında yer alan minör sebzeler oldukça fazla sayıdadır. Bunlardan bazıları Tablo 1’de verilmiştir. Bu sebze türlerinden karnabahar, brokoli, roka, bürüksel lahanası, baş lahana, kırmızı lahana ve yaprak lahana gibi türler en yaygın olarak bilinen, kullanılan ve tüketilen bitkilerdir. Bu nedenle çalışmamızda, bu türlerin dışında ülkemizde üretimi hiç yapılmayan veya çok az bilinen ancak üretimi ve ihracat potansiyeli yüksek olabileceği öngörülen bazı sebze türleri ile ilgili bilgilerin verilmesi uygun bulunmuştur.

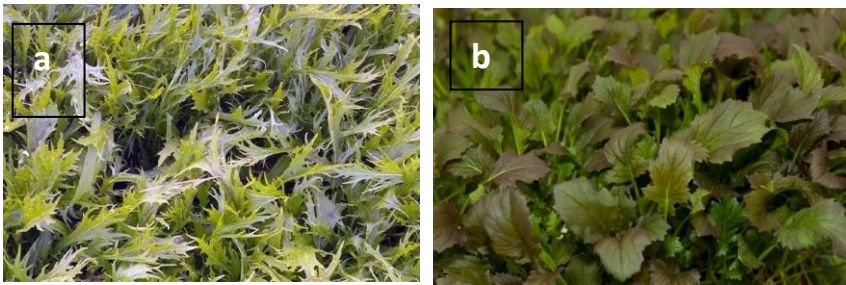
2.1. Mizuna Yetiştiriciliği

Mizuna (*Brassica rapa* L. var. *japonica*) ve Mibuna (*Brassica rapa* L. var. *nipposinica*) uzak doğu ülkelerinde popüler yeşil yapraklı sebzelerdir. Mizuna hafif hardal benzeri, biberli bir tada sahip olan ve geleneksel Japon yemeklerinde kullanılan bir sebzedir. Mizuna, “Japon hardal yeşillikleri”, “Kaliforniya biber otu” ve “örümcek hardalı” olarak da adlandırılmaktadır. Çin kökenli olduğu düşünülse de mizuna yüzyıllardır Japonya’da yetiştirilmektedir. Mizuna Japonca’da “su yeşillikleri” anlamına gelmektedir. Taze mevsimlik malzemelerin ustalıkla hazırlandığı ve ustalıkla sunulduğu Japon imparatorluk ziyafet sofralarında standart bir yeşil sebze olmuştur (Anonim, 2025a). Modern çağda ise Mizuna, besinsel ve organoleptik profili, hızlı üretim döngüsü, kompakt büyüme alışkanlığı ve yüksek CO₂ konsantrasyonlarına dayanıklılığı nedeniyle astronot diyetini desteklemek amacıyla uzay aracında yetiştirilmeye uygun bir bitki olarak görülmektedir (Darby ve ark., 2024). Mizuna ve mibuna, her ikisi de kompakt yapraklı bitkilerdir ve benzer isimleri kafa karıştırıcı olsa da yaprakları çok farklı olduğundan birbirinden ayırt edilmesi kolaydır.

- **Mizuna**, yaprak formları tırtıklı ve gövde rozet şeklindedir. Hafif biberli bir tada sahiptir ve yaprakların küçük olduğu evrede salatalarda çiğ olarak veya daha büyükken sotelerde pişirilerek kullanılmaktadır. Mizuna neredeyse tüm yıl boyunca hasat edilebilir.

Ayrıca, yaprak şekli ve renginde farklılıklar sunan çeşitleri bulunmakta olup, bazıları daha ince bölünmüş, diğerleri kırmızımsı-mor veya limon yeşili, renkleri ile bahçelere ve sofralara daha dekoratif bir katkı sağlamaktadır (Şekil 1a, b).

- **Mibuna**, hafif hardal aromasına sahip daha dar, koyu yeşil, pürüzsüz kenarlı yaprakların daha büyük, daha yoğun kümeler oluşturur. Salatalarda veya hafifçe pişirilerek kullanılmaktadır (Anonim, 2025b).



Şekil 1. Mizuna bitkisinde yaprak şekilleri (a tırtıklı), (b kırmızı renkli). (Anonim, 2025a; Anonim, 2025b)

Mibuna, mizunaya göre daha sert bir dokuya ve daha güçlü bir acılığa sahiptir ve genellikle turşu şeklinde kullanılmaktadır. Bu çeşitler arasındaki en göze çarpan morfolojik fark yaprak şekilleridir (Şekil 1). Mizuna karakteristik tırtıklı yapraklara sahipken (Şekil 2a), mibunanın basit spatulat yaprakları bulunmaktadır (Şekil 2b). *B. rapa* alt türlerinin filogenetik analizleri mizuna ve mibunanın farklı alt gruplar oluşturduğunu ve Japonya'ya özgü olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, mibunanın, mizuna popülasyonundan spatül yaprak şekli, tat ve doku gibi çekici özellikleri nedeniyle birbirinden farklıdır (Kawakatsu ve ark., 2021).



Şekil 2. Mizuna (a) ve mibuna (b) bitkilerinin yaprak morfolojisine ait genel görünüm (Anonim, 2025c, Anonim, 2025d)

Mizuna ve mibuna bitkileri Kyoto’da yetiştirilen en eski sebzeler arasında yer almakta ve eski Japon literatüründe sıkça tanımlanmaktadır. Kyoto bölgesinde “Kyo-yasai” (‘Kyo’ ve “yasai” sırasıyla Kyoto ve sebze anlamına gelmektedir) olarak bilinen çeşitli geleneksel sebzeler bulunmakta ve bu türler arasında mizuna ve mibuna en başta gelmektedir. Mizuna yüzyıllardır geleneksel Japon diyetinin temelinde yer almakta ve önceleri haşlanmış olarak tüketilirken günümüzde genellikle salatalarda kullanılmaktadır. Yerel geleneklere ve törenlere entegre edilmiş olup Japonya’nın geleneksel kültürünün bir parçası olarak kabul edilmektedir (Kawakatsu ve ark., 2021).

Mizuna uzun, ince, gevrek saplara ve rozetler halinde büyüyen oldukça tırtıklı yapraklara sahiptir. Yaprak renkleri çeşitlere göre değişmektedir. ‘Yaz mizunası’ daha koyu yeşil yapraklara ve açık yeşil saplara, ‘Beni Houshi’ ve ‘Japanese Pink’ mizuna çeşitleri mor saplara ve yeşil yapraklara, ‘Japanese Red Mustard’ mizuna çeşidi ise yeşil saplara ve koyu mor yapraklara sahiptir (Anonim, 2025a).

Mizuna yetiştiriciliği açıkta veya örtü altında doğrudan tohum ekimi ya da fide dikimi şeklinde yapılabilir. Tohumlar önce viyoller içerisine ekilerek fide elde edildikten sonra üretim parsellerine aktarılabilir. Bitkiler az yer kapladığından örtü altında ve yüksek tünellerde yıl boyunca yetiştiricilik yapmak mümkündür. İlkbahar ve sonbaharın serin, nemli havasında iyi şekilde büyüme gösterirler ve genellikle kışa kadar ürün vermeye devam etmektedirler (Anonim, 2025b).

Tüm çeşitleri organik madde bakımından zengin ve iyi drenaja sahip toprakları tercih etmektedir. Üretim sezonu süresince toprak nemi muhafaza edilerek düzenli sulama gerçekleştirilmelidir. Yaprakları tüketilen sebze olduğundan kurak koşullar yaprak gelişimini olumsuz etkileyerek verim ve kalite kaybına yol açmaktadır. Yetiştiricilik süresince toprak havalandırılmalı düzenli olarak çapa ve bakım işlemleri gerçekleştirilmelidir.

Hafif donlara karşı toleranslı olması mizunayı erken ilkbahar veya sonbahar ekimi için ideal bir sebze haline getirmektedir. Ancak uzun süreli düşük sıcaklıklarda bitki gelişimi olumsuz etkilemektedir (Eşiyok ve ark., 2013). Kısmi gölgeye toleranslı olsa da, en iyi gelişme tam güneşte gerçekleşmekte, bu da günde en az 6 saat güneşlenme isteği anlamına

gelmektedir. Serin iklim sebzesi olan mizuna bitkileri diğer *Brassica* türlerinde olduğu gibi ilkbaharda sıcaklığın yükselmesiyle birlikte çiçeklenme eğilimindedir. Erselik çiçek yapısına sahiptir (Kalisz ve ark., 2012). Çiçeklenmeden sonra oluşan meyveler kapsül (siliqua) şeklinde olup, küçük ve yuvarlak yapıya sahip tohumları bu meyvelerin içinde gelişmektedir (Günay, 1984). Tohumların çimlenme özellikleri ise diğer *Brassica* türleri ile benzerlik göstermektedir.

Erken yeşillik döneminden tam olgunluğa kadar herhangi bir aşamada hasat edilebilmektedir. Bitkinin tamamı yere yakın bir yerden kesilerek hasat edilmektedir. Ancak alternatif olarak, yeşillikleri yerden 5-6 cm veya daha fazla yukarıdan gövde zararlanmayacak şekilde keserek tekrar ürün elde edilebilmektedir. Bu yöntem yeniden büyümeye ve tüm sezon boyunca hasatta süreklilik sağlamaktadır. En iyi kalite için sabahları çiğ kuruduktan sonra, ancak günün sıcaklığı yeşillikleri yumuşatmadan önce, hasat edilmelidir (Anonim, 2025a). Geç ekimlerde tohum ekiminden yaklaşık olarak 40-45 gün sonra bitkiler hasada gelmektedir. Hasat sonrasında mizuna yaprakları 1-5°C’de %90-95 oransal nem içeren depolarda muhafaza edilebilmektedir.

2.2. Mibuna Yetiştiriciliği

Brassicaceae familyasının diğer bir üyesi ve mizunanın yakın akrabası olan mibuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) Japon mibunası olarak da bilinmektedir. Hafif hardalımsı bir tada sahip, oldukça besleyici bir Asya sebzesidir. Uzakdoğu ve Asya ülkelerinde geniş alanlarda üretimi yapılan mibunanın anavatanı Japonya’dır. Uzun, ince ve mızrak şeklindeki yapraklara sahip olan mibunanın yaprakları hafifçe pişirilerek veya salatalara, çorbalara ve kızartmalara eklenerek tüketilmektedir (Şekil 2b; Şekil 3).



Şekil 3. Mibuna bitkisinin yapraklarına ait görünüm (Anonim, 2025e)

Mibuna yetiştiriciliği nispeten kolaydır. Bitkiler belirli bir miktar yaz sıcağını tolere etse de serin iklim sebzeleri arasında yer almaktadır. Yaprakları tüketilen sebzeler grubunda yer alan mibuna, zengin besin değerine sahiptir. İyi bir A, C ve E vitamini kaynağıdır. Ayrıca taze yaprakları potasyum, kalsiyum, magnezyum, fosfor, demir, manganez, beta-karoten ve folik asit içermektedir (Eryılmaz Acıkgoz, 2012). Bu içeriklerinden dolayı birçok hastalığa karşı vücuda direnç kazandırmaktadır.

Brassica grubu sebzeler içerisinde mibuna ve mizuna Türkiye’de fazla tanınmamasına ve üretimi yapılmamasına rağmen Asya ülkelerinde oldukça fazla bilinen ve sıklıkla tüketilen bitkiler arsında yer almaktadır. Mibuna sahip olduğu zengin besin içeriğinin yanında minimum ve maksimum sıcaklıklara kolay adaptasyonu nedeniyle Türkiye’de yıl boyunca üretilebilme potansiyele sahiptir (Furkan ve Deveci, 2019). Hem mibuna hem de mizuna kısa vejetasyon süresi ile örtü altı üretimi için alternatif ürünlerdir. Kolay yetiştirilebilen ve yaprakları yenen tek yıllık bir sebze olduğundan diğer ürünlerin arasında ara bitkisi veya sınır bitkisi olarak da yetiştirilmesi mümkündür (Adiloğlu ve ark., 2015). Bu bitkiler, alanın dar olduğu durumlarda veya bordürlerde kısa süreli boşlukları doldurmak için veya ana ürünün gerçek büyüklüğüne ulaşana kadar örneğin patates gibi yavaş büyüyen bitkilerin arasına ekilebilmektedir.

Mibuna, yüzlek kök sistemine sahiptir. Gövdesi rozet şeklinde gelişim göstermektedir. Yaprakları koyu yeşil renkte, kenarları düz ve tırtıksız olup, ince ve uzun yapıdadır (Şekil 3). Morfolojik özellikleri bakımından mizuna ile benzerlik gösteren mibunanın çiçekleri de erselik yapıdadır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte bitki generatif devreye girerek çiçeklenme başlar. Ancak

yapraklarını düzenli olarak toplayarak, toprağı nemli tutarak ve sıcak dönemlerde gölgeleme sağlayarak çiçeklenme bir süre geciktirilebilmektedir. Çiçeklenme durdurulamaz hale geldiğinde, yapraklar hala iyi tat veriyorsa tüm bitki hasat edilmelidir. Ayrıca oluşmaya başlayan çiçek sapları ve çiçekler de tüketilebilmekte, salatalara ve sotelere eklenebilmektedir (Anonim, 2025b). *Brassicaceae* familyasına has kapsül (siliqua) şeklindeki meyveler içerisinde tohumlar oluşmaktadır.

Açıkta veya örtü altında yetiştirilebilen mibuna, tohum olarak doğrudan toprağı ekilebildiğı gibi, viyollerde fide olarak da yetiştirilmesi kolay bir sebzedir. Neredeyse tüm yıl boyunca ekilebilmekte, ancak örtü altında kışın kontrollü ortamlarda yetiştiricilik gerektirmektedir. Serin iklim sebzesi olduğundan, ilkbahar ve sonbaharın ılıman, nemli havasında en iyi şekilde gelişim göstermektedirler. Erken ilkbahar döneminde açıkta yetiştiricilik için havanın çok soğuk olduğu bölgelerde Şubat-Mart aylarında örtü altında yetiştiricilik idealdir. Kış boyunca üretim yapabilmek için ise sonbahar başında Ağustos-Eylül aylarında seraya tohum ekimi yapılabilmektedir (Eşiyok ve ark., 2013).

Açıkta yetiştiricilikte ekim sezonu mart ayından ağustos ayına kadar sürmektedir. Sıcak ve kuru koşullar ile artan gün uzunlukları bitkilerin erken çiçek açmasına (sürgüne) neden olabilir. Bu nedenle yazın hafif gölge ve daha serin yerler seçilmelidir.

Tohumları diğer *Brassica* grubu sebzelerde olduğu gibi oldukça küçüktür ve bu nedenle toprağın ekim öncesi güzel hazırlanmış olması gerekmektedir. Tohumlar önceden hazırlanmış toprağı yaklaşık 1 cm derinliğe sıra üzerine yüzlek bir şekilde ekilerek üzeri hafifçe toprakla örtülmelidir. Sıra arası mesafe 20 cm bırakılarak küçük gruplar halinde de ekilebilmektedir. Ekim sonrası tohumlar yaklaşık bir hafta içinde çimlenmektedir. Tohumlar çıktıktan sonra fazla sıklığı önlemek amacıyla fidelerde seyreltme işlemi yapılmalıdır. Sıra arası ve sıra üzeri mesafe yani bitkiler arası boşluk onları hangi aşamada hasat etmek istediğimize göre değişiklik göstermektedir. Küçük yapraklı dönemde hasat edilecekse, bitkiler arasında 10-15 cm, daha büyük yapraklı dönemde hasat edilecekse 20 cm ve tam olgun dönemde hasat için de 30-40 cm mesafe bırakılması uygun olmaktadır (Anonim, 2025b; Anonim 2025f). Bir vejetasyon döneminde sürekli hasat ve işgücünün etkin bir şekilde kullanımını sağlamak için birkaç hafta arayla küçük gruplar halinde ekilmeleri önerilmektedir.

Mibuna bitkisi nemli ortamlardan hoşlanmaktadır. Özellikle yaz sıcağında toprağı sürekli nemli tutmak için gerektiğı miktarda düzenli sulama yapılması gerekmektedir. Düzenli sulama, yaprakların acılaşmasını ve gevşemesini önlemeye yardımcı olmaktadır. Toprağı nemli ve serin tutmak ve yabancı otları engellemek amacıyla bitkilerin etrafına ince bir malç tabakası da uygulanabilmektedir. Kuraklık yaprak gelişimini olumsuz etkilemekte ve bu da verim kaybına neden olmaktadır (Eşiyok ve ark., 2013, Anonim, 2025f). Sulama için en ideal zaman sabah saatleridir. Sıcak havalarda nem hızla buharlaşacağından gün ortasında sulama yapmaktan kaçınmak gerekmektedir. Özellikle yabancı ot mücadelesi amacıyla üretim sezonu boyunca düzenli çapa yapılmalıdır.

Mibunanın küçük yapraklı hasat zamanında yapraklar 8-10 cm boyunda olduklarında hasat edilmektedir. Sıcak havalarda, ekimden üç hafta kadar sonra hasat yapılabilmekte ancak bekletilirse daha büyük yapraklar veya tam bitkiler hasat edilebilmektedir. Hasat edilen bitkiler mizunada olduğu gibi 1-5°C sıcaklıkta ve %90-95 oransal nem içeren depolarda muhafaza edilmelidir.

2.3. Komatsuna Yetiştiriciliğı

Komatsuna veya Japon hardal ıspanağı (*Brassica rapa* var. *perviridis*), *Brassicaceae* familyasından diğer yaprağı yenen sebzelerden bir tanesidir. Adı, Japonya'da yetiştirildiğı 'Komatsugawa' bölgesinden gelmektedir. Komatsuna, Japonya ve diğer Uzakdoğı ülkelerinde yıl boyunca yetiştirilmektedir. İyi bir kalsiyum kaynağı olan komatsuna, ıspanağı benzeyen geniş yeşil yapraklara sahiptir. Yaprakları demetler halinde hasat edilmektedir (Şekil 4). Komatsuna yaprakları hafif tatlı, hardalımsı yumuşak bir tada sahiptir. Genel olarak, yapraklar ne kadar olgunsa, komatsunanın ağızda yarattığı karıncalanma lezzeti de o kadar güçlü olmaktadır. Genç ve yumuşak yaprakları salatalarda diğer yeşilliklerle birlikte ya da daha olgun yaprakları kızartmalarda kullanılmaktadır. Bitki hem yumuşak yaprakları hem de çiçekli sapları için kullanılmakta, çiğ veya pişmiş olarak tüketilmektedir. Japonya bölgesinde popüler olan komatsuna aslında ıspanakla akraba değildir. Morfolojik özellikleri, iklim istekleri ve yetiştirme teknikleri bakımından lahana gibi diğer *Brassica* grubu sebzelerle benzer özellikler göstermektedir. Ayrıca, komatsuna Tayvan ve Kore gibi diğer Uzakdoğı ülkelerinde yoğun bir şekilde tüketildiğinden üretimi çoğunlukla bu ülkelerde yapılmaktadır.

Zengin besin içeriğine sahip olan taze komatsuna yaprakları özellikle B₆, C ve E vitamini, kalsiyum, folik asit, karoten, manganez, bakır ve lif içermektedir. Komatsuna yapraklarında vücudumuzun kanserle savaşmasına yardımcı olan sülforafan bileşiği bulunmaktadır (Anonim, 2025g). Komatsunanı yetiştiriciliği ülkemizde bilinmemekte ve yetiştiriciliği yapılmamaktadır (Acikgoz ve ark., 2014). Ancak zengin besin içeriği, düşük ve yüksek sıcaklığa kolay adapte olabilme kapasitesi nedeniyle Türkiye’de yıl boyunca üretim potansiyeline sahiptir (Acikgoz ve Altintas, 2011).

Komatsunanın çok fazla sayıda çeşidi bulunmaktadır. ‘Summerfest’ çeşidi sıcak mevsim ekimi için tercih edilirken, kışa da oldukça dayanıklıdır. ‘Torasan’ başka bir komatsuna çeşididir. Komatsuna ayrıca, komatsuna × tatsoi melezi olan ‘Misome’ ve komatsuna × baş lahana melezi olan ‘Senposai’ gibi bazı benzersiz çeşitler oluşturmak için diğer *Brassica* türleri ile melezlenerek de yetiştirilmektedir (Anonim, 2025h). Kırmızı bir varyetesi olan ‘Kırmızı Komatsuna’ sağlam beyaz-yeşil bir sap ve büyüme süresince giderek kırmızıya dönüşen yapraklara sahiptir.



Şekil 4. Komatsuna yapraklarına ait bir görünüm (Anonim, 2025i)

Komatsuna soğuk havalara toleranslı olan bir bitkidir ve aşırı sıcaklar bitki gelişimini olumsuz etkilemektedir. Birçok iklimde yıl boyunca yetiştirilebilen komatsuna, yetiştiriciliği yapılan başka bir sebzenin arasında ara bitkisi veya sınır bitkisi olarak da yetiştirilebilmektedir (Anonim, 2025i).

Toprak istekleri bakımından seçiciliği olmayan komatsunanın erken dönemde azota olan ihtiyacı fazladır. Bu nedenle ekim öncesi veya ekimle birlikte azot bakımından zengin gübreler kullanılmalıdır. Ayrıca organik maddece zengin, killi tınlı ve iyi drene olan topraklar tercih edilmelidir (Eşiyok ve ark., 2013). Diğer *Brassica* grubu sebzelerde olduğu gibi komatsuna, düzenli

sulama, gübreleme ve yabancı otlardan arındırılmış bir alan dışında çok az bakım gerektirmektedir.



Şekil 5. Komatsuna bitkisine ait bir görünüm (Anonim, 2025j)

Serin iklim sebzeleri grubunda yer alan komatsuna mart ayından eylül ayına kadar açıkta üretimi yapılabilmektedir. Bitkiler çok sıcak havalarda su kaybederek kalite kaybı (gevreklik ve lezzet kaybı) yaşayacağından yaz ortası ekimlerinden kaçınmak gerekmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklar hızlıca bitkinin generatif döneme geçmesine ve çiçeklenip tohum oluşturmaya neden olmaktadır. Çiçek şekilleri diğer *Brassica* türlerine benzerlik göstermekte olup erselik yapıya sahiptir. Meyveleri kapsül şeklinde olup, küçük ve yuvarlak tohumlar meyvelerin içerisinde oluşmaktadır. Tohumlarının oldukça küçük olmasından dolayı açıkta yetiştiricilik için ekim öncesi toprağın iyi hazırlanması gerekmektedir.

Tohumlar 15 cm aralıklarla ekildikten sonra istenilen hasat büyüklüğüne göre gerekirse 30 cm'ye kadar seyreltme yapılabilmektedir. Erken ilkbahar döneminde yapılacak yetiştiricilikte ise tohumlar şubat ayında örtü altında viyollere ekilmektedir ve ekimden yaklaşık olarak 15-20 gün sonra fideler üretim parsellerine dikilmektedir. Fide olarak dikilirse, dikimden üç-dört hafta sonra genç yapraklar hasat edilebilmekte ve gerektiğinde daha büyük yapraklar sık sık kesilerek bakım işlemleri devam etmektedir. Çeşitlerin çoğu 30-45 cm boya ulaşmakta ve bitkiler dik büyüdüğü için sık ekim aralığı ile yetiştirilebilmektedir.

Komatsuna bitkisinin bakımı kolay olup tohumun ekimden itibaren yaklaşık 40 gün sonra hasat olgunluğuna gelmektedir (Anonim, 2025h). Yapraklar herhangi bir aşamada gövdenin yaklaşık olarak 2 cm üzerinden hasat edilebilmektedir. Hasatta ıspanak gibi bitki olarak küme halinde gövdenin

altından tek seferde hasadı yapılabileceği gibi, yapraklar tek tek veya 2'şerli olarak farklı zamanlarda da koparılabilir (Şekil 5). Sadece birkaç yaprak alındığında yeniden büyüyerek bir bitkiden 3-4 kez hasat yapmak mümkün olmakta ve böylece hasat süresi uzamaktadır. Hasat edilen yapraklar ıspanak bitkisinde olduğu gibi demetlenerek pazara hazırlanmaktadır. Yapraklar mizuna ve mibunaya benzer şekilde 1-5°C sıcaklık ve %90-95 oransal nem içeren depolarda muhafaza edilebilmektedir.

2.4. Savoy Lahanası Yetiştiriciliği

Brassicaceae familyasına ait savoy lahanası (*Brassica oleracea* L. var. *sabauda*) özel bir baş lahana türüdür ve kıvrıkcık yaprakları ile karakterizedir (Anonim, 2025k). *B. oleracea* var. *capitata* ve var. *sabauda* birbirine çok benzer formlardır. Tepe sürgünün uzamasının kısıtlanması ve yaprakların üst üste binmesiyle baş oluşmuştur. Günümüzde yabani lahana formlarına Batı Avrupa sahilleri ve Akdeniz çevresinde rastlamak mümkündür ve savoy lahanasının Kuzey Akdeniz ülkelerinden çıktığı belirtilmektedir (Günay, 1984).

Savoy lahanası adını, 14. yüzyılda İsviçre, Fransa ve İtalya sınırında yer alan ve bir zamanlar Savoy Hanedanı olarak bilinen İtalyan kraliyet ailesi tarafından yönetilen bir bölgeden almaktadır. Birçok farklı ülke tarafından işgalci komşulara karşı bir tampon ve ticaret yolu olarak değerlendirilen savoy, pek çok mutfak kültürünün merkezi haline gelmiştir.

Serin iklim sebzeleri arasında yer alan savoy lahanasının yetiştiriciliği diğer lahanalara benzemektedir. İlkbahar ve yaz aylarında yetiştirilen, yaprakları ve başı daha az sıkı olan yazlık çeşitler yanında, büyük ve yeşil başlı olan kışlık savoy lahanaları bulunmaktadır. Serin iklime sahip bölgelerde yıl boyunca yetiştirilebilmekte ancak sıcak iklime sahip bölgelerde yetiştiricilik daha serin geçen kış aylarında yapılmaktadır.

Savoy lahanası soğuğa dayanıklı bir bitkidir ve lahana (*Brassica oleracea*)'nın diğer varyetelerine göre soğuğa çok daha dayanıklıdır. -15°C'ye kadar düşen sıcaklıklara toleranslıdır. Çoğu çeşit kışı açık havada geçirebilmektedir. Yaz sıcaklarından önce olgunlaşmaları ve baş bağlayabilmeleri için bitkileri ilkbaharda yeterince erken dönemde dikimlerinin yapılması gerekmektedir (Anonim, 2025k, Anonim, 2025l; Anonim, 2025m). Dünyada pek çok farklı türde lahana yetiştirilmekteyken bu çeşitlilik Türkiye'de sınırlıdır. Ancak farklı değerlendirme şekillerinin yaygınlaştırılması

kıvrıcık yapraklı savoy lahanasının üretiminin ve tüketiminin artırılmasına katkıda bulunacaktır (Yağmur ve ark., 2003).

Besleyicilik özellikleri bakımından lahana grubu sebzeler arasında olgun muadillerine kıyasla iyi bir kalsiyum, magnezyum ve sodyum kaynağıdır. Ayrıca, potasyum ve diğer mineraller ile A, K ve C vitaminleri açısından da oldukça zengindir. 100 gramlık bir porsiyon çiğ yeşil savoy lahanasının yaklaşık olarak %91'i sudur ve 2 gram protein, 6 gram karbonhidrat ve 3 gram lif içermektedir. Düşük kalorili sebzeler arasında yer alan kıvrıcık yapraklı savoy lahanası hem taze hem de pişmiş olarak kullanılmaktadır (Dereje ve ark., 2023). Yapraklar sert gibi görünse de savoy yapraklarının özelliği, çiğken bile dikkat çekici derecede yumuşak ve tatlı olmalarıdır. Bu özellikleri onları taze salatalarda, sebze dürümlerinde veya balık, pilav ve diğer ana yemeklerde yatak olarak kullanmak için mükemmel hale getirmektedir. İtalya'da verza stufata, pancetta ile kızartılmış savoy lahanası ve genellikle sonbahar ve kış aylarında garnitür olarak servis edilmektedir. Fransa'da savoy lahanasına sarılıp pişirilen bir dolma olan sou-fassum olarak tüketilmektedir. Yıl boyunca yetiştirilebilmesine rağmen, kışlık çeşitler yazın yetişenlere göre daha yumuşak ve tatlı olma eğilimindedir (Anonim, 2025).



Şekil 6. Savoy lahanasından bir görünüm (Anonim, 2025).

Savoy lahanası morfolojik özellikler bakımından beyaz baş lahana ile benzerlik göstermektedir. Savoy lahanası, lahana kadar sıkı olmayan bir başa sahiptir. Sıradan beyaz baş lahana ile savoy lahanası arasındaki en belirgin fark görünüşüdür. Genellikle ortada daha sıkı olan ve dışa doğru yavaş yavaş açılan kıvrıcık ve buruşuk yapraklara sahiptir (Şekil 6). Lahananın ortasında, boyunca uzanan kabarık damarlar bulunmaktadır.

İki yıllık bir bitki olan savoy lahanası, lahana grubundaki diğer sebzeler de olduğu gibi çiçeklenebilmeleri için belirli bir süre düşük sıcaklığa gereksinimleri bulunmaktadır. Yetiştiriciliğin ilk yılında, vejetatif gelişimi ve baş oluşumu gerçekleşirken ikinci yılda bitkiler sapa kalkarak çiçeklenmekte ve tohumları oluşmaktadır. İyi bir tohumluk üretimi için tüm büyüme dönemi boyunca gözlemlenen sağlıklı bitkiler seçilmelidir. Düzenli ve hızlı büyüme, hızlı baş oluşumu, iyi depolama kapasitesi, erken büyüme, soğuğa ve hastalıklara karşı dayanıklı çeşitlerin veya bitkilerin seçilmesi yetiştiricilik başarısını arttırmaktadır (Anonim, 2025m). Ayrıca pazarlanabilir savoy lahanasında kısa saplı ve sivri, düz veya yuvarlak başlı çeşitlerin tadı ve rengi belirleyici olmaktadır.

Kazık kök sistemine sahip olan savoy lahanasının açıkta yetiştiricilik yapıldığında bu kazık kökler daha belirgin iken, fide ile yetiştiricilikte ana kazık kök daha zayıf gelişmekte ve onun yerini birkaç adet çatallanmış kök almaktadır. Etli ve kalın bir yapıya sahip olan kökler genellikle toprağın 20-40 cm derinliğinde yer almaktadır. Kalın ve kuvvetli bir gövdeye sahiptir. Gelişimin ilk aşamalarında otsu bir yapıya sahip olan gövde ilerleyen dönemlerde dokuların kalınlaşmasıyla odunsu bir hal almaktadır (Günay, 1984). Savoy lahanasının kıvrıkcık olan yaprakları ise kısa bir sap ile gövdeye bağlanmıştır. Dış yapraklar iç yapraklara oranla daha kıvrıkcık olup çeşide göre yaprak renkleri farklılık göstermektedir. Dış yaprakların rengi koyu yeşilken başın iç kısımlarına doğru yaprak rengi beyazlamaktadır (Eşiyok ve ark., 2013). Ayrıca, kırmızı ve mor renk içeren renkli çeşitler de bulunmaktadır. Çiçekleri lahana grubu sebzelerde olduğu gibi sarı renkte ve erselik yapıdadır. İlkbaharda sıcaklığın artmasıyla birlikte bitki vejetatif devreden generatif devreye geçerek çiçeklenmektedir. Tozlanma ve dölllenme sonucunda taç ve çanak yapraklar dökülerek yumurtalık kapsül şeklini almakta ve içinde tohumlar oluşmaktadır.

Tohum hasadı geciktirilirse baklalarda kuruma ve çatlamalar meydana gelerek tohumlar dökülmeye başlamaktadır. Bakla renginin sarıdan kahverengine dönüşmesi tohumların olgunlaştığını göstermektedir.



Şekil 7. Renkli yapraklı savoy lahanası çeşitlerine ait görünüm (Anonim, 2025n a; Anonim, 2025o)

Savoy lahanasının çeşitleri genel olarak, erkenci, orta ve geçici olmak üzere üç farklı olgunluk grubunda yer almaktadır. Savoy lahanası hem fide ile yetiştiricilik hem de doğrudan ekim için uygundur. Fide ile yetiştiricilikte savoy lahanasının erkenci çeşitleri Şubat- Mart ayına kadar ekilmektedir. Orta çeşitler için Mayıs-Haziran ayları, geçici çeşitler için Eylül-Ekim-Kasım aylarında ekim yapılabilir. Geç dönem savoy lahana çeşitlerinin çoğu açık havada da sorunsuz bir şekilde kışı geçirebilmektedir. Erkenci çeşitler ekilirken eğer gece don riski varsa, üzerlerini bahçe örtüsü ile örtmek faydalı olacaktır (Anonim, 2025p). Fide yetiştiriciliği için sıcaklık 12°C'nin altına düşmemelidir. Tohumlar çok erken ekildiğinde çiçeklenme için gerekli düşük sıcaklık isteği karşılanmış olacağından fideler üretim yerine aktarıldıklarında bitkilerde çiçeklenme meydana gelmektedir. Tohumları tarlaya direk ekerek yapılan yetiştiricilikte toprak hazırlığı son derece önemlidir. Tohumlar çok küçük olduğundan toprak freze ile işlendikten sonra tırmıkla düzeltilmelidir. Ekim öncesinde toprak kesikli bırakıldığında tohumlar derine düşmekte ve çıkışta düzensizlik yaşanabilmektedir.

Fidelerin tarlaya aktarılmasından önce pişkinleşmesini ve daha soğuk sıcaklıklara uyum sağlamasını beklemek gerekmektedir. Savoy lahanasını, sıralar arasında başların büyüklüğüne göre 50-70 cm ve sıra üzerinde 40-50 cm boşluk bırakılmalıdır. Savoy lahanası yetiştirirken toprak pH'sı 6,5 ile 6,8 arasında, nemli, iyi drenajlı ve organik madde açısından zengin olmalıdır. Bu gereksinimlerle başlanan üretimde savoy lahanasına bakmak oldukça zahmetsizdir. Savoy lahanasında, toprağı serin, nemli ve yabani otları az tutmak için kompost, ince öğütülmüş yapraklar veya kabuklar ile malçlama yapılabilir (Anonim, 2025l).

Brassica grubu sebzeler yağmurlama sudan hoşlanmaktadırlar. Yağmurlama sulama havanın nemini de arttırdığından bitkileri sürekli nemli tutmak, strese girmelerini ve verim kayıplarını önlemektedir. Lahanaların baş oluşturmaları için sıcaklığın 15-20°C arasında olması idealdir. Sonbaharda sıcaklıkların 10°C ve altında seyretmesi baş oluşumunu olumlu etkilemekte ve başların sıkışmasını sağlamaktadır. Baş oluşum döneminde sıcaklığın artması ve düzensiz sulama başlarda gevşeme ve kalite kayıplarına neden olmaktadır (Günay, 1984).

Toprak istekleri bakımından çok fazla seçici olmayan savoy lahanası toprak işlemeden de hoşlanmaktadır. Büyüme aşamasında bitkinin etrafındaki toprağı zaman zaman çapa ile gevşetmek gerekmektedir. Savoy lahanası kazık köklü bir bitki olduğundan tarla hazırlığı sırasında toprağın derin sürülmesi ve düzenli olarak gevşetilmesi gerekmektedir. Savoy lahanası çok az bakım gerektirdiğinden ve oldukça kolay bir şekilde yetiştirilebildiğinden genellikle hobi bahçeleri için de ideal bir sebzedir. Aşırı gübreleme, hastalıklara karşı direncin azalmasına ve kükürtlü bir tadın oluşmasına neden olduğu ve raf ömrünü de kısalttığı için kaçınılmalıdır (Anonim, 2025k; Anonim, 2025o; Anonim, 2025p).

Savoy lahanasında hasat zamanı çeşide bağlı olarak değişmekle birlikte erkenci çeşitlerin hasadı Eylül- Ekim aylarından itibaren başlamaktadır. Hasat elle ya da makina ile yapılabilir. Hasat sonrasında lahanaların dış yaprakları ile eğer köklü olarak sökülüp yapıldıysa kökleri temizlenerek pazara hazırlanmaktadır. Savoy lahanası kullanmadan hemen öncesine kadar yıkanmamalıdır çünkü nem bozulmayı hızlandırmaktadır. Hasat edilen lahanalar soğuk hava depolarında 1-2°C sıcaklıkta %90-95 nemde 4-6 ay muhafaza edilebilmektedir (Anonim, 2025o).

3. SONUÇ

Brassicaceae familyasında yer alan çok geniş tür ve alttürlerde sebze türleri bulunmaktadır. Ülkemizde ise bu türlerden karnabahar, lahanası ve brokoli en yaygın olarak bulunan ve yetiştirilen türlerdir. Bunun dışında ülkemizde henüz yetiştiriciliği yapılmayan ve tanınmayan mibuna, mizuna, kamatsuna ve savoy lahanası gibi yaprağı yenen, kısa vejetasyon süresine sahip, hem yazlık hem de kışlık olarak yetiştirilebilen bitkilerin potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca bu bitkilerin gerek örtü altı gerekse açıkta üretimi bakımından ülkemizin uygun

ekolojik bölgelere sahip olması önemli avantaj olarak görülmektedir. Dolayısıyla çiftçilerimize alternatif olarak sunulabilecek bu bitkiler üzerine araştırmaların yapılarak uygun ekolojilerdeki adaptasyonları belirlenmelidir. Bu bitkilerin ülkemiz sebze tarımı ve ekonomisi için önemli birer seçenek haline gelebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abu, M., Osei-Kwarteng, M. & Seidu, A. (2021). Comparative studies on compound and single-based fertilizers on the food-yield potential of exotic, minor vegetable crops cultivated for the fresh market. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 53(2), 98-105.
- Acikgoz, F. E. & Altintas, S. (2011). Seasonal variations in vitamin C and mineral contents and some yield and quality parameters in komatsuna (*Brassica rapa* var. *pervidis*). *J. Food Agric. Environ.*, 9, 289-291.
- Acikgoz, F. E., Adiloglu, A., Daglioglu, F., Adiloglu, S., Celikyurt, G. & Karakas, O. (2014). The effect of increasing doses of nitrogen (N) application for some nutrient elements, vitamin C and protein contents of komatsuna (*Brassica rapa* var. *perviridis*) plant. *Bulg. J. Agric. Sci.*, 20(2), 321-324.
- Al Shrouf, A. (2017). Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. *Academic Scientific Journal of Engineering and Technological Sciences*, 27(1), 247-255. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953491>
- Anonim (2025a). <https://extension.psu.edu/mizuna-an-asian-green>
- Anonim (2025b). <https://www.rhs.org.uk/vegetables/mizuna-mibuna/grow-your-own>
- Anonim (2025c). <https://www.harvst.co.uk/how-to-grow-mizuna-mibuna/>
- Anonim (2025d). <https://www.asiaseeds.com/product/mibuna/>
- Anonim (2025e). <https://www.anamurnaturel.com/urun/dogal-mibuna-tohumu-50-tohum>
- Anonim (2025f). <https://www.gardeningknowhow.com/edible/vegetables/greens/mibuna-mustard-greens.htm>
- Anonim (2025g). <https://www.urbancultivator.net/learn-about-komatsuna/>
- Anonim (2025h). <https://www.gardeningknowhow.com/edible/vegetables/greens/growing-komatsuna-greens.htm>
- Anonim (2025i). <https://tamarorganics.co.uk/product/organic-oriental-komatsuna-red>

- Anonim (2025j). <https://premierseedsdirect.com/product/premier-seeds-direct-organic-mustard-komatsuma-tendergreen>
- Anonim (2025k). <https://www.thespruceeats.com/what-is-savoy-cabbage-5191435>
- Anonim (2025l). <https://www.gardeningknowhow.com/edible/vegetables/cabbage/growing-savoy-cabbage.htm>
- Anonim (2025m). <https://www.diyseeds.org/tr/film/savoy-cabbage/>
- Anonim (2025n). <https://premierseedsdirect.com/product/savoy-cabbage-diverona/>
- Anonim (2025o). <https://www.kitchengardenseeds.com/purple-savoy-cabbage.html>
- Anonim (2025p). <https://fryd.app/en/library/plants/1506-cabbagesavoycabbage>
- Ciriello, M., Campana, E., Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Graziani, G., Cardarelli, M., Colla, G., De Pascale, S. & Rouphael, Y. (2024). Plant-derived biostimulant as priming agents enhanced antioxidant and nutritive properties in brassicaceous microgreens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(10), 5921-5929.
- Darby, E.W., Armstrong, S.P. & Walters, K.J. (2024). Bioregenerative dietary supplementation in space: *Brassica rapa* var. *nipposinica* and other *Brassica* cultivars. *Life Sciences in Space Research*, 42, 140-147.
- Di Gioia, F., De Bellis, P., Mininni, C., Santamaria, P. & Serio, F. (2017). Physicochemical, agronomical and microbiological evaluation of alternative growing media for the production of rapini (*Brassica rapa* L.) microgreens. *J. Sci. Food Agric.* 97(4), 1212–1219.
- Eryilmaz Acikgoz, F. (2012). Determination of yield and some plant characteristics with 407 vitamin C, protein and mineral material content in mibuna (*Brassica rapa* var. *nipposinica*) and mizuna (*Brassica rapa* var. *japonica*) grown in fall and spring sowing times. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 9(1), 64-70.
- Eşiyok, D., Bozokalfa, M.K., & Aşçıoğlu, T.K. (2013). Egzotik Sebze Türleri ve Yetiştiriciliği. Ege Üniversitesi yayınları, Ziraat Fakültesi Yayın No:571

- FAO (2025a). Food and Agriculture Organization of the United Nations <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- FAO (2025b). Food and Agriculture Organization of the United Nations <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>.
- FAO (2025c). Food and Agriculture Organization of the United Nations <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- Furkan, Z.E. & Deveci, M. (2019). Alternatif Yeşilliklerde (Mibuna, Mizuna ve Komatsuna) tuz stresinin meydana getirdiği bazı morfolojik değişikliklerin belirlenmesi. II. Uluslararası Tarım ve Orman Kongresi, 8-9 Kasım, İzmir, Türkiye, 233-245.
- Gentry, M. (2019). Local heat, local food: Integrating vertical hydroponic farming with district heating in Sweden. *Energy*, 174, 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.119>
- Hanlon, P.R. & Barnes, D.M. (2011). Phytochemical composition and biological activity of 8 varieties of radish (*Raphanus sativus* L.) sprouts and mature taproots. *J. Food Sci.* 76, 185-192.
- Huang, H., Jiang, X., Xiao, Z., Yu, L., Pham, Q. & Sun, J. (2016). Red cabbage microgreens lower circulating low-density lipoprotein (LDL), liver cholesterol, and inflammatory cytokines in mice fed a high-fat diet. *J. Agric. Food Chem.* 64, 9161–9171.
- Kalisz, A., Sękara, A. & Kostrzewa, J. (2012). Effect of growing date and cultivar on the morphological parameters and yield of *Brassica rapa* var. *japonica*. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 11(3), 131-143.
- Kawakatsu, Y., Sakamoto, T., Nakayama, H., Kaminoyama, K., Igarashi, K., Yasugi, M., Kudoh, H., Nagano, A.J., Yano, K., Kubo, N., Notaguchi, M. & Kimura, S. (2021). Combination of genetic analysis and ancient literature survey reveals the divergence of traditional *Brassica rapa* varieties from Kyoto, Japan. *Horticulture Research*, 8.
- Kimura, S. & Kawakatsu, Y. (2016). Evolutionary history of leaf shape diversification found in Mizuna and Mibuna. Kyoto Sangyo Univ. Essays Humanit. Ser. No. 49
- Manchali, S., Murthy, K.N.C. & Patil, B.S. (2012). Crucial facts about health benefits of popular cruciferous vegetables. *Journal of Functional Foods*, 4(1), 94–106.

- Mir, S.A., Shah, M.A. & Mir, M.M. (2017). Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(12), 2730-2736.
- Murphy, C.J., Lort, K.F. & Pill, W.G. (2010). Factors affecting the growth of microgreen table beet. *International Journal of Vegetable Science*, 16(3), 253–266. [https://doi.org/ 10.1080/19315261003648241](https://doi.org/10.1080/19315261003648241)
- Pallazola, V.A., Davis, D.M., Whelton, S.P., Cardoso, R., Latina, J.M. & Michos, E.D. (2019). A clinician's guide to healthy eating for cardiovascular disease prevention. *Mayo Clin. Proc. Innov. Qual. Outcomes*, 3, 251–267.
- Paraschivu, M., Cotuna, O., Sarateanu, V., Durau, C. C. & Paunescu, R. A. (2021). Microgreens-current status, global market trends and forward statements. *Scientific papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 633–639.
- Pinto, E., Almeida, A. A., Aguiar, A. A. & Ferreira, I. M. (2015). Comparison between the mineral profile and nitrate content of microgreens and mature lettuces. *Journal of Food Composition and Analysis*, 37, 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.06.0>
- Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K., Thorp, K.R., Hameed, I.A., Weltzien, C., Ahmad, D. & Shad, Z.M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: a transition to plant factories and urban agriculture. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 11(1), 1–22.
- Sharma, A., Hazarika, M., Heisnam, P., Pandey, H., Devadas, V. S., Singh, D., Wangsu, M. & Kartha, B. D. (2023). Influence of storage conditions, packaging, post-harvest technology, nanotechnology and molecular approaches on shelf life of microgreens. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100835.
- Sharma, S., Shree, B., Sharma, D., Kumar, S., Kumar, V., Sharma, R. & Saini, R. (2022). Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. *Food Research International*, 155, 111038.
- Shibaeva, T.G., Sherudilo, E.G., Rubaeva, A.A. & Titov, A.F. (2022). Continuous LED lighting enhances yield and nutritional value of four genotypes of *Brassicaceae* microgreens. *Plants*, 11, 176.

- Sun, J., Xiao, Z., Lin, L.-z., Lester, G. E., Wang, Q. & Harnly, J. M. (2013). Profiling polyphenols in five Brassica species microgreens by UHPLC-PDA-ESI/HRMS n. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(46), 10960–10970.
- Thuong, V.T. & Minh, H.G. (2020). Effects of growing substrates and seed density on yield and quality of radish (*Raphanus sativus*) microgreens. *Res. Crops* 21(3), 579–586.
- TÜİK (2025). Türkiye İstatistik Kurumu <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>.
- Xiao, Z., Lester, G. E., Luo, Y., & Wang, Q. (2012). Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(31), 7644–7651. <https://doi.org/10.1021/jf300459b>
- Xiao, Z., Rausch, S. R., Luo, Y., Sun, J., Yu, L., Wang, Q., Chen, P., Yu, L., & Stommel, J. R. (2019). Microgreens of brassicaceae: genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 101, 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.076>
- Yağmur, B., Kavak, S., Uğur, A., Bozokalfa, M. K., & Eşiyok, D. (2003). Potasyum uygulamalarının savoy lahanasında (*Brassica oleracea* L. var. *sabauda*) verim ve kalite özellikleri üzerine etkisi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 40(2), 113-120.

BÖLÜM 12

ELMA (*Malus domestica* L.) ÇEŞİTLERİ ARASINDA ŞEKİL VE BOYUT VARYASYONLARININ MORFOMETRİK ANALİZİ

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI^{1*}

Arş. Gör. Cihat GEDİK²

Dr. Mustafa ÇOMAKLI³

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16372801>

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye. bahadir.sayinci@bilecik.edu.tr (*Sorumlu yazar), Orcid ID: 0000-0001-7148-0855

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye. cihat.gedik@bilecik.edu.tr, Orcid ID: 0000-0003-4955-2220

³ Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye. mustafa.comakli@atauni.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-3974-1354

1. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)'nın 2023 yılı istatistiklerine göre dünya elma üretimi yıllık 97.3 milyon tondur. Elma üretimi bakımından dünya sıralamasında Çin ve Birleşmiş Milletlerden sonra 3. sırada olan Türkiye'de yılda 4.6 milyon ton elma üretilmektedir (FAO, 2023). Besin içeriği zengin (Yarılgaç ve diğerleri, 2023) ve ticaret potansiyeli oldukça yüksek olan elmanın (Arısoy ve diğerleri, 2019) boyut ve şekil özellikleri doğrudan tüketim dahil olmak üzere tarım, gıda, sağlık, biyoteknoloji ve kozmetik sektörlerinde kalite standartlarının sağlanması ve sektör taleplerinin karşılanması açısından önemlidir. Makineli hasat için ağaçtaki meyvenin tespiti (Zhang et al., 2021), kalitesine göre tasnif edilmesi (Er ve diğerleri, 2013), büyüklüğüne göre sınıflandırılması (Sert ve diğerleri, 2010), hasar gören meyvelerin ayıklanması (Leemans et al., 2002) ve kurutma amacıyla dilimlenmesi (Yılmaz & Bozkurt, 2019) gibi pek çok ürün işleme sistemlerinin tasarlanması ve geliştirilmesi için meyvenin fiziksel özelliklerini tanımlayan mühendislik verilerine gereksinim duyulmaktadır.

Elmanın kalite standartlarını belirleyen unsurlar çap, uzunluk, yüzey alanı ve hacim gibi fiziksel özelliklerdir (Kara et al., 2013). Meyvenin kalite sınıfının ve işlenebilirlik ölçütünün belirlenebilmesi için referans olarak boyut özellikleri esas alınmaktadır (Brosnan & Sun, 2004). Boyutlarına göre sınıflandırmada kullanılan geleneksel yöntemlerde meyveler, operatör deneyimine bağlı olarak manuel ölçümlerle veya gözle yapılan denetimlerle ayrıştırılmaktadır. Bu süreç zaman yönetimi açısından verimsiz olduğu kadar subjektif değerlendirmeye dayalı olduğundan doğru sınıflandırma için risk oluşturmaktadır. Ayrıca standart olmayan sınıflandırmadan dolayı nakliye, paketleme ve ürün işlemede verim düşmektedir. Meyvelerin boyutsal özelliklerinin otomatik, hızlı ve güvenilir bir şekilde analiz edilebilmesi için sensör tabanlı görüntü işleme ve yapay zeka destekli görüntü analiz sistemleri geliştirilmiştir (Blasco et al., Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm, 2007).

Meyvelerin şekli; çeşide bağlı morfolojik yapı, büyüme evresindeki iklim ve çevresel etkiler ve genetik varyasyonlar doğrultusunda değişkenlik göstermektedir. Pazarlama, tüketici talebi ve endüstriyel işleme gibi çeşitli alanlarda şekil standardizasyonu, ürünün kalitesinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Blasco et al., Machine vision system for automatic

quality grading of fruit, 2003). Meyve şekli öncelikle tüketici tercihlerini etkileyen morfolojik bir özellik olup subjektif değerlendirmeye açıktır. Meyvelerin şekil özellikleri iki boyutlu kontur analizi, şekil indeksi, dairesellik, en/boy oranı ve küresellik parametreleriyle tanımlanabilmektedir (Ercisli et al., 2012; Sayıncı et al., 2015; Demir et al., 2022). Endüstriyel uygulamalarda subjektif yaklaşımlar tekrarlanabilirlik açısından yetersizliğe yol açtığından ürün işleme sistemlerinde (dilimleme, ayırma, paketleme vb.) verimi düşürmektedir. Meyve şekli aynı zamanda hasat sırasında ürünün mekanik hasar riskini, taşıma sırasında zedelenmesini, otomatik sistemlerde ayırma ve sınıflandırma hatalarını, paketlemede ambalaj yerleşimini, dilimlemede standardizasyonu etkilemektedir (Arivazhagan et al., 2013). Bu nedenle meyvelerin otomatik kontrol hatlarında şekil parametrelerine dayalı olarak sınıflandırılması ve ayrıştırılması kritik düzeyde önemli bir ürün işleme basamağıdır.

Bu çalışmanın amacı; mekanik sistemlerle boyutlarına göre sınıflandırılarak doğrudan tüketime hazır olarak pazara sunulan üç farklı elma çeşidini boyutsal ve şekilsel açıdan karşılaştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda araştırmada endüstriyel ürün işleme sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi için gerekli mühendislik verilerinin ortaya konması ve meyve suyu, püre, sirke gibi ürünlerin yapımında veya dilimleme ve kurutmada kullanılacak elma çeşitlerinin fiziksel özellikleriyle ilgili özgün bir veri setinin ortaya konması hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Elma Çeşitleri

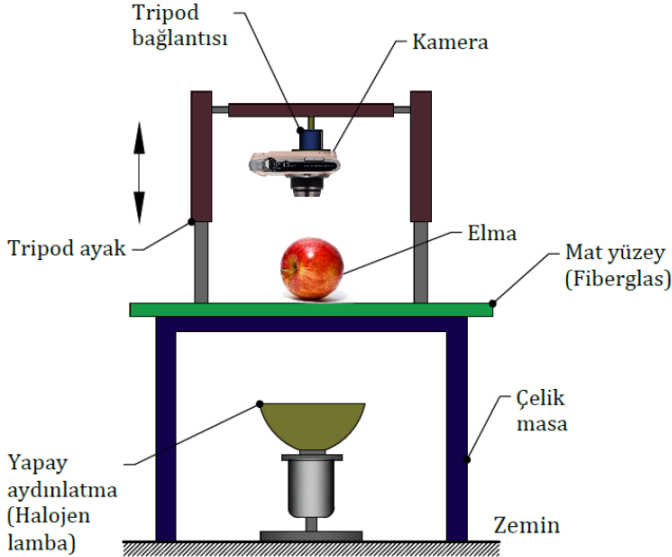
Araştırmada ülkemizde yaygın olarak yetiştirilen Golden Delicious, Granny Smith ve Starking Delicious olmak üzere (Saraçoğlu & Akçakal, 2019) üç elma çeşidi kullanılmıştır (Şekil 1). Aynı dönemde hasat edilen çeşitler, sınıflandırma ve ayırma sistemlerinde doğrudan tüketim, meyve suyu üretimi ve kurutma amaçlı tasnif edilmiştir. Bu gruplar arasında doğrudan tüketime hazır olan çeşitlerin her birinden şansa bağlı 20'şer elma örneği seçilmiştir. Örnekler, görüntüleme zamanına kadar +4 °C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir.



Şekil 1. Elma çeşitleri

2.2. Görüntüleme Sistemi

Boyut ve şekil analizi için elma örneklerinin her biri Şekil 2’de gösterilen sistemle görüntülenmiştir. Meyve rengi ve zemin arasında kontrast oluşturmak için mat ve beyaz renkli fiberglas levha kullanılmıştır. Görüntüleme sırasında zeminde oluşan meyve gölgesini elimine etmek ve meyvenin konturlarını keskinleştirmek için alttan aydınlatma yapılmıştır. Görüntülemede Casio EX Z60 dijital kamera kullanılmış ve görüntüler 40 cm yükseklikten alınmıştır. Uzunluk kalibrasyonu (piksel’den mm’ye) için her bir görüntü, milimetrik cetvel görseliyle birlikte alınmıştır. Görüntülerin her biri .jpg uzantılı dosya biçiminde ve 2816×2112 piksel ölçülerinde kaydedilmiştir.



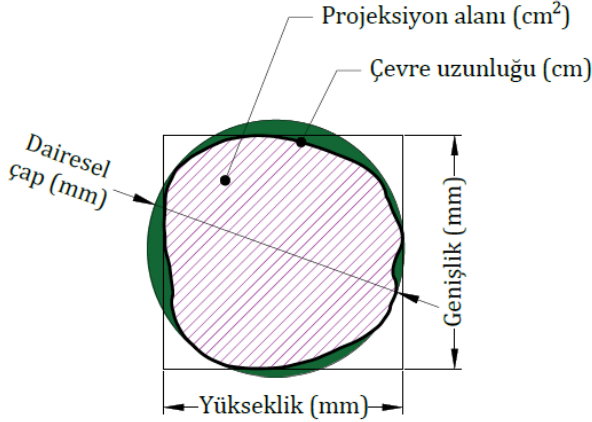
Şekil 2. Meyve görüntüleme sistemi

2.3. Görüntü İşleme

Boyut analizi için ImageJ v.1.38x yazılımı kullanılmıştır (Rasband, 1997-2018). Resim dosyalarında piksel birimiyle ölçülen uzunluk birimini milimetreye (mm) dönüştürmek için kalibrasyon yapılmış ve bir piksel ölçüsü 0.0596 mm olarak belirlenmiştir. Analiz öncesi yapılan işlemler; renkli görüntüleri .bmp uzantılı olarak kaydetme; görüntüleri 0-255 ölçek aralığındaki gri tona dönüştürme; kalibrasyonla belirlenen dönüştürme faktörünü atama; eşik uygulayarak siyah-beyaz görüntüleri elde etme şeklinde sıralanmıştır.

2.4. Boyut Analizi

Dijital dosya üzerindeki elma görseli otomatik olarak tanımlanmış ve objenin projeksiyon alanı (cm²), çevre uzunluğu (cm), en büyük dairesel çapı (mm), genişliği (mm) ve yüksekliği (mm), en/boy oranı ve dairesellik değerleri otomatik olarak ölçülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. Elmanın görüntü işlemeyle belirlenen bazı boyutları

2.5. Eliptik Fourier (EF) Analizi

Elma çeşitleri arasındaki şekilsel farklılıklar EF yöntemiyle belirlenmiştir. Elma görselleri 24 bitlik .bmp uzantılı dosyaya dönüştürülmüş ve analizler SHAPE (v. 1.03) programıyla yapılmıştır (Iwata & Ukai, 2002). EF analizi için yapılan işlemler sırasıyla elma görsellerinin monokroma dönüştürülmesi; filtreleme ve gürültü azaltma; şekil konturlarının kodlanması;

en uzun yarıçap metoduyla kontur kodlarının normalize edilmesi ve EF tanımlayıcılarının elde edilmesi; şekil tanımlayıcılarının temel bileşenler analizine (PCA) tabi tutulması ve şekil varyasyonlarının görselleştirilmesi aşamalarından oluşmuştur. PCA sonucunda meyvenin şekil varyasyonunu yüksek oranda açıklayan bileşenler belirlenmiştir. Her bir bileşene ait şekil farklılıkları $\pm 2 \cdot \text{Standart sapma}$ aralığında görselleştirilmiş ve her bir bileşenin toplam varyansı açıklama oranı çizelge halinde verilmiştir. Ayrıca elma çeşitleri arasındaki farklılıkları ortaya çıkarmak için her bir elma görseline ait temel bileşenlerin (PC) skor katsayıları (bileşen skorları) otomatik olarak belirlenmiştir.

Fourier teoremi, kapalı bir eğrinin farklı frekanslardaki sinüs ve kosinüs dalgalarının üst üste eklenmesiyle oluşan bir seri olup bu toplamda kullanılan sin-cos çifti sayısı, harmonik sayısı olarak tanımlanmaktadır. Elmanın konturunu yüksek frekanslı dalgalar ekleyerek oluşturmak ve kontur farklılıklarını ortaya çıkarmak için 20 harmonik kullanılmıştır (Neto et al., 2006).

2.6. İstatistik Analiz

Analiz sonucunda ölçülen boyut verileri Excel'e kaydedilmiş ve makro kullanılarak verilerin ortalaması ($\bar{x}$), standart sapması (SS), minimum (min) ve maksimum (maks) değerleri ve varyasyon katsayısı ($CV = (SS/\bar{x}) \cdot 100$) hesaplanmıştır. Elma çeşitleri arasındaki boyut farklılığının önemini test etmek için veriler tek yönlü varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuş ve önemli bulunan ortalamalar arasındaki fark $p < 0.05$ önem düzeyinde Tukey testiyle belirlenmiştir.

Temel bileşen skorlarına göre elma çeşitleri arasındaki farklılıklar çok değişkenli varyans analiziyle (MANOVA) belirlenmiş ve değişken çiftleri arasındaki karşılaştırmalar düzeltilmiş Bonferroni testiyle yapılmıştır. Ayrıca çoklu grup ortalamaları arasındaki ayrılışlar Mahalanobis uzaklık değerleriyle verilmiştir. Temel bileşenlerin (PC) elmanın kendi çeşit kategorisini ayırt etmedeki gücünü test etmek için diskriminant (ayırma) analizi yapılmıştır. Bu amaçla elma çeşitleri bağımlı değişken, her bir temel bileşene ait skorlar (bileşen skorları) ise bağımsız değişken olarak atanmıştır. Diskriminant fonksiyonların oluşturulmasında adım adım yöntemi (stepwise) kullanılmış ve etkili olmayan bağımsız değişkenler modele dahil edilmemiştir. Analiz

sonucunda temel bileşenlerin elmanın şekil açısından kendi çeşit kategorisini belirlemedeki başarısı yüzde (%) olarak belirlenmiştir. İstatistik analizler SPSS 22.0 ve PAST 4.03 yazılımları kullanılarak yapılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Elma çeşitlerinin boyut özelliklerine ait varyans analizi sonuçları ve ortalamalar arasındaki farklılıklar Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Elmanın boyut özellikleri

A. Yüzey alanı, çevre ve çap ölçüleri					
Elma çeşitleri	İstatistikler	Projeksiyon alanı (PA, cm ²)	Çevre uzunluğu (P, cm)	En büyük çap (D, mm)	
Granny Smith	$\bar{x} \pm SS^1$	50.34±2.59 a*	25.28±0.66 a	82.89±2.09 a	
	Min-maks ²	44.58-54.38	23.75-26.24	77.98-85.70	
	CV (%) ³	5.1	2.6	2.5	
Starking Delicious	$\bar{x} \pm SS$	46.42±2.34 b	24.50±0.61 b	81.23±2.01 b	
	Min-maks	43.59-50.78	23.62-25.50	78.04-85.42	
	CV (%)	5.0	2.5	2.5	
Golden Delicious	$\bar{x} \pm SS$	41.19±1.59 c	22.99±0.42 c	75.31±1.56 c	
	Min-maks	37.71-43.74	22.06-23.76	72.18-77.62	
	CV (%)	3.9	1.8	2.1	
F istatistiği		85.932	82.728	87.657	
p değeri		0.000**	0.000**	0.000**	
B. En, boy ve bazı şekilsel parametreler					
Elma çeşitleri	İstatistikler	Genişlik (W, mm)	Yükseklik (H, mm)	En/boy oranı (AR)	⁴ Dairesellik (R)
Granny Smith	$\bar{x} \pm SS$	77.99±2.82 a	79.62±2.21 a	1.047±0.022 a	1.011±0.010 a
	Min-maks	72.95-82.37	75.27-82.31	1.010-1.100	1.000-1.030
	CV (%)	3.6	2.8	2.1	0.5
Starking Delicious	$\bar{x} \pm SS$	77.50±3.20 a	75.19±2.78 b	1.065±0.036 a	1.030±0.010 c
	Min-maks	72.89-83.62	71.94-81.59	1.010-1.130	1.020-1.050
	CV (%)	4.1	3.7	3.4	0.7
Golden Delicious	$\bar{x} \pm SS$	69.06±2.32 b	73.65±1.35 b	1.068±0.030 a	1.022±0.010 b
	Min-maks	64.84-72.53	71.52-76.88	1.010-1.120	1.010-1.040
	CV (%)	3.4	1.8	2.8	0.6
F istatistiği		64.184	39.918	2.987	43.703
p değeri		0.000**	0.000**	0.058 ^{ns}	0.000**

¹ : Ortalama±standart sapma (Veri sayısı, n = 20)

² : Veri seti içindeki en küçük ve en büyük değer (Minimum-maksimum)

³ : Varyasyon katsayısı [$CV = (SS/\bar{x}) \cdot 100$]

⁴ : $R = P^2/4 \cdot \pi \cdot PA$ eşitliği kullanılarak otomatik olarak hesaplanmıştır.

* : Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre aynı sütunda farklı harfle gösterilen ortalamalar arasındaki fark p<0.05 seviyesinde önemlidir.

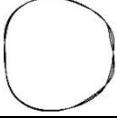
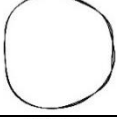
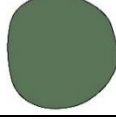
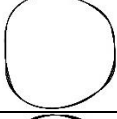
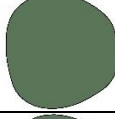
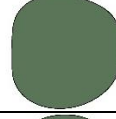
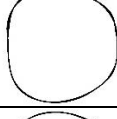
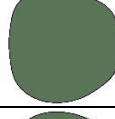
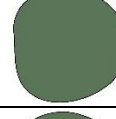
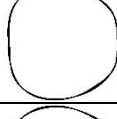
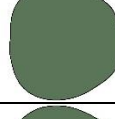
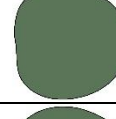
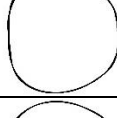
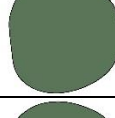
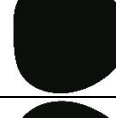
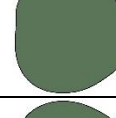
** : p<0.01 çok önemli

^{ns} : önemsiz

Çeşitlerin en/boy oranı hariç diğer boyut özellikleri çok önemli düzeyde birbirlerinden farklıdır. Projeksiyon alanı, çevre uzunluğu ve çap ortalaması büyükten küçüğe doğru Granny Smith, Starking Delicious ve Golden Delicious olarak sıralanmıştır. Granny Smith hem uzunluk açısından en büyük ortalamaya sahip, hem de daire geometrisine en yakın çeşittir. Yükseklik ortalaması açısından Golden Delicious ve Starking Delicious çeşitleri arasındaki fark önemsizdir. Golden Delicious çeşidinin genişlik ölçüsü, en düşük ortalamaya sahiptir. Boyut istatistiklerinin çoğunda Golden Delicious çeşidinin CV değerleri en düşük değerdedir. Granny Smith çeşidi, projeksiyon alanı ve çevre uzunluğu bakımından en büyük CV değerine sahiptir. Genişlik, yükseklik ve en/boy oranı istatistikleri incelendiğinde ise en büyük CV, Starking Delicious çeşidinde bulunmuştur.

Çizelge 2'deki ortalama elma geometrisi yanlarda şişkin, üstten ve alttan basıktır. Şekil varyansına ait en büyük yükü PC1 taşımakta olup hem üstten hem de alttan asimetric bir değişimi açıklamaktadır. Elmanın tabanındaki çukurlaşma ve sivrileşme asimetricdir. Elmanın sap yuvasında oluşan çıkıntı tek taraflı ve belirgindir. PC2'de meyvenin sap yuvasındaki geometri dış ve iç bükey arasında değişmiştir. Elmanın çiçek çukurunda (tabanda) ise şekil varyasyonu hafif düzeyde çukurlaşma ve sivrileşme şeklindedir. PC3'den sonraki bileşenlerin tümünde elmanın sap yuvasındaki değişim hafif düzeyde çukurlaşma ve dış bükey arasında; çiçek çukurundaki değişim ise kendi arasında asimetric, sivrileşme ve çukurlaşma şeklindedir.

Çizelge 2. Elma çeşitleri arasındaki şekil farklılığını açıklayan temel bileşenler ve varyansı açıklama oranları

Temel bileşenlerin şekil varyansını açıklama oranı*		$-2 \cdot SS$	Ortalama	$+2 \cdot SS$
PC1 (%29.69)				
PC2 (%17.88)				
PC3 (%13.52)				
PC4 (%8.44)				
PC5 (%5.77)				
PC6 (%4.89)				
PC7 (%3.86)				
PC8 (%3.04)				
PC9 (%2.60)				
PC10 (%1.83)				

*: Temel bileşenler (PC) analizi sonucunda ilk 12 bileşen tarafından açıklanan toplam varyans %95.0 düzeyindedir. Çizelgede şekil farklılığını %91.75 oranında açıklayan ilk 10 temel bileşenin varyans etkisi görselleştirilmiştir.

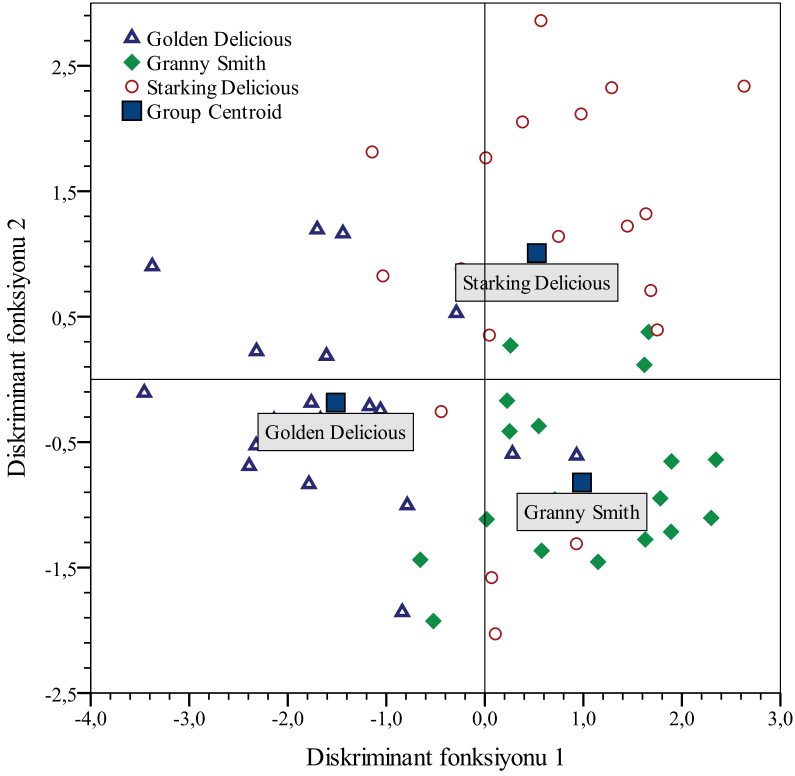
Çizelge 3’te verilen diskriminant analizi sonucuna göre elma örneğinin çeşit kategorisini tahmin etmede yalnızca PC2, PC4, PC5, PC7 ve PC9 bileşenlerinin etkili olduğu belirlenmiş ve diğer temel bileşenler analize dahil edilmemiştir. Çok değişkenli varyans analizi (MANOVA) sonuçları, elma çeşitleri arasında şekilsel açıdan çok önemli düzeyde farklılıkların olduğunu bildirmektedir. Wilks’ lambda istatistiğinin 0’a yakın olması da bu sonucu doğrulamaktadır. Bonferroni çoklu karşılaştırma testi ve Mahalanobis mesafesi sonuçlarına göre tüm elma çeşitleri 0.05 anlamlılık düzeyinde birbirlerinden ayırt edici özelliklere sahiptir. Özdeğer istatistikleri incelendiğinde 2 diskriminant fonksiyonu oluşmuştur. 1. ve 2. fonksiyonlar gruplar arasındaki varyansı sırasıyla %67.3 ve %32.7 oranında açıklamaktadır. Her bir fonksiyonun elma çeşitlerini ayırt etmedeki başarısı sırasıyla %55.4 ve %37.7’dir. Wilks’ Lambda istatistiklerine göre elmanın çeşit kategorisini ayırt etmede her iki fonksiyon çok önemli düzeyde ($p < 0.01$) anlamlıdır. Ancak Wilks’ Lambda istatistiği daha düşük olduğundan 1. ve 2. fonksiyonun birlikte (1-2) grupları ayırt etmedeki etkisi, 2. fonksiyona göre daha yüksektir. Kanonik diskriminant fonksiyon katsayılarına göre 1. fonksiyon, elma örneklerini PC2, PC7 ve PC9 değişkenleriyle; 2. fonksiyon ise PC4 ve PC5 değişkenleriyle ayırt etmektedir. Diskriminant fonksiyonlarının elma örneklerini doğru sınıflandırma başarısı veya elmanın çeşit kategorisini doğru tahminleme başarısı %81.7 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4’te elma çeşitlerinin merkezi koordinatları gösterilmiştir. Fonksiyon 1, Golden Delicious ve Granny Smith çeşitlerini PC2, PC7 ve PC9 bileşenleriyle belirgin şekilde ayırt edebilmektedir. Şekil varyansları incelendiğinde Golden Delicious çeşidinin sap yuvasındaki çukurlaşma, Granny Smith’e göre daha fazladır. Ayrıca Golden Delicious çeşidinin yan yüzeyleri düzlemsel iken Granny Smith’in kavisli bir yapısı vardır. Starking Delicious ve Granny Smith çeşitlerinin merkeze yakın olması, çeşitler arasındaki ayırt ediciliği sınırlandırmıştır. Fonksiyon 2, elma çeşitlerini PC4 ve PC5 bileşenleriyle ayırt etmektedir. Her iki bileşendeki varyasyonun ana kaynağı, çiçek çukurundaki şekil farklılığıdır. Buna göre Starking Delicious çeşidinin çiçek çukuru çift tepeli olup Granny Smith’e göre asimetriktir. Granny Smith’in çiçek çukurundaki asimetrilik ise hafif düzeyde ve sivri formdadır.

Çizelge 3. Diskriminant analizi sonuçları

A. Grup ortalamalarının eşitlik testi (SPSS 22.0)					
Temel bileşenler	Wilks' Lambda	F	df1 [§]	df2	p (sigma)
PC2	0.783	7.882	2	57	0.001**
PC4	0.761	8.930	2	57	0.000**
PC5	0.773	8.363	2	57	0.001**
PC7	0.840	5.424	2	57	0.007**
PC9	0.911	2.779	2	57	0.071*
B. Çok değişkenli varyans analizi (MANOVA) sonuçları (PAST 4.03)					
Test istatistikleri	Değer	df1	df2	F	p (sigma)
Wilks' Lambda	0.2778	10	106	9.510	0.000**
Pillai Trace	0.9310	10	108	9.406	0.000**
C. Düzeltilmiş Bonferroni testi (p düzeyi, üst üçgen) ve Mahalanobis mesafeleri (alt üçgen) (PAST 4.03)					
	Golden Delicious	Granny Smith	Starking Delicious		
Golden Delicious		3.1696E-06	1.8004E-05		
Granny Smith	6.6525		8.5660E-04		
Starking Delicious	5.5865	3.5565			
D. Özdeğer istatistikleri (SPSS 22.0)					
Fonksiyonlar	Özdeğer istatistiği	Varyansı açıklama oranı (%)	Kümülatif (%)	Kanonik korelasyon (CC)	Etki derecesi (CC ²)
1	1.242	67.3	67.3	0.744	0.554
2	0.605	32.7	100.0	0.614	0.377
E. Fonksiyonların önem testi sonuçları - Wilks' Lambda istatistikleri (SPSS 22.0)					
Fonksiyonların testi	Wilks' Lambda	Ki-kare	df	p (sigma)	
1 - 2	0.278	70.420	10	0.000**	
2	0.623	26.005	4	0.000**	
F. Değişkenlerin çeşidi tahmin etme gücü-Kanonik diskriminant fonksiyon katsayıları (SPSS 22.0)					
Temel bileşenler	Fonksiyon 1	Fonksiyon 2			
PC2	0.775	0.301			
PC4	0.364	0.796			
PC5	0.519	-0.681			
PC7	0.711	-0.200			
PC9	0.566	-0.084			
G. Sınıflandırma sonuçları (Doğru sınıflandırma oranı %81.7 olarak belirlenmiştir) (SPSS 22.0)					
Elma çeşitleri	Golden Delicious	Granny Smith	Starking Delicious	Toplam	
Golden Delicious	%85	%10	%5	%100	
Granny Smith	%5	%85	%10	%100	
Starking Delicious	%10	%15	%75	%100	

§: df, serbestlik derecesi; **: p<0.01 çok önemli; p<0.1 önemli



Şekil 4. Elma çeşitlerinin diskriminant fonksiyonlarına göre dağılımı ve merkezi koordinatlar

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Uluslararası ticarete kullanılan elma standardı UNECE FFV-50 olup (FFV, Fresh Fruit and Vegetables) Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE, United Nations Economic Commission for Europe) tarafından yayımlanmıştır (UNECE Standard FFV-50, 2020). Bu standarda göre elmanın sınıf kategorisi Ekstra, Sınıf I ve Sınıf II olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Ekstra kategorisi kalite, şekil ve renk bakımından çeşide özgü en yüksek gereklilikleri; Sınıf I kategorisi, hafif şekil kusurlarının kabul edildiği yüksek kaliteli sınıfı ve Sınıf II kategorisi, pazar tüketimine uygun belirgin dış kusurlara izin verilen sınıfı tanımlamaktadır. Elmanın minimum boyutu 60 mm veya kütlesi 90 g olarak belirtilmektedir. Ancak şeker içeriği yüksek olan ≥ 50 mm (veya ≥ 70 g) olan elmanın da kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. Aynı

paket içinde elmanın boyut ve şekil açısından tutarlı olması beklenmekte olup Ekstra kategorisindeki elmaların kabul edilebilir çap toleransının ± 5 mm ve Sınıf I ve Sınıf II kategorileri için ± 10 mm aralığında olduğu belirtilmiştir.

Tüketici tercihleri dikkate alındığında doğrudan tüketimde elmanın boyutsal özellikleri pazar talebini oluşturan bir etmendir. Elma çeşitleri arasında boyut açısından gözle fark edilmeyecek düzeyde anlamlı farklılıklar vardır. Bu farklılıklar elma yetiştiriciliğinin yapıldığı bölgelerin iklim özelliğiyle değişebildiği gibi agroteknik gerekliliklerin karşılanmasına da bağlıdır. Nitekim elmanın morfolojik özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili Boyacı (2019), Golden Delicious ve Granny Smith elma çeşitleri için en $\times$ boy ölçülerini sırasıyla 71.10 $\times$ 65.88 mm ve 72.89 $\times$ 63.20 mm olarak belirlemiştir. Benzer şekilde Coşkun & Aşkın (2016), Starking Delicious çeşidinin en $\times$ boy ortalamasını 72.1 $\times$ 64.7 mm olarak ölçmüştür. Buna karşın Yarılgâç vd. (2023) klon anaçları üzerine aşılanan Granny Smith çeşidinin en $\times$ boy ortalamasını ise 79.85 $\times$ 74.83 mm olarak belirlemiştir. Elmanın en ve boy ölçülerinin çeşitler arasında farklılaşması çevre uzunluğu, dairesel çap ve projeksiyon alanı verilerini de orantılı olarak değiştirmektedir. Elmanın projeksiyon görseli, daire geometrisine çok yakın olmasına rağmen çeşitler arasında minimal düzeydeki farklılıklar aynı bölge koşullarında meyvenin çeşit kategorisi için ayırt edici olabilmektedir.

Elmanın ön projeksiyon görseli esas alındığında sap yuvası derin olan elma çeşidi, Golden Delicious olarak tanımlanabilir. Dairesellik ortalamasına göre Granny Smith çeşidi, daire geometrisine en yakın elma çeşididir. Ayrıca Granny Smith'in yan yüzeylerinin diğer çeşitlere göre daha kavisli ve çiçek çukurunun sivri olması, bu çeşide ayırt edici bir özellik kazandırmaktadır. Starking Delicious çeşidinin çiçek çukurundaki asimetric ve çift tepeli yapısı, onu diğer çeşitlerden farklı kılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Arisoy, H., Aras, İ., & Kaya, M. (2019). Türkiye'nin elma dış ticaretindeki bölgesel yoğunlaşma durumu. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(2), s. 242-252.
- Arivazhagan, A., Newlin Shebiah, R., Ananthi, S., & Vishnu Varthini, S. (2013). Detection of unhealthy region of plant leaves and classification of plant leaf diseases using texture features. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), pp. 211-217.
- Blasco, J., Aleios, N., & Moltó, E. (2003). Machine vision system for automatic quality grading of fruit. *Biosystems Engineering*, 85(4), pp. 415-423.
- Blasco, J., Aleixos, N., & Moltó, E. (2007). Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm. *Journal of Food Engineering*, 81(3), pp. 535-543.
- Brosnan, T., & Sun, D. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision-a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), pp. 3-16.
- Demir, B., Sayinci, B., & Elkıran, S. (2022). Physical characteristics of cherry (*Prunus avium*) varieties and shape analysis with the elliptic Fourier method. *Erwerbs-Obstbau*, 64(2), pp. 171-181.
- Er, O., Cetişli, B., Sofu, M., & Kayacan, M. (2013). Gerçek zamanlı otomatik elma tasnifleme. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(2), s. 31-38.
- Ercisli, S., Sayinci, B., Kara, M., Yıldız, C., & Ozturk, I. (2012). Determination of size and shape features of walnut (*Juglans regia* L.) cultivars using image processing. *Scientia Horticulturae*, 133, pp. 47-55.
- FAO. (2023). Crops and livestock products. *FAOSTAT*.
- Iwata, H., & Ukai, Y. (2002). SHAPE: A computer program package for quantitative evaluation of biological shapes based on elliptic Fourier descriptors. *Journal of Heredity*, 93, pp. 384-385.
- Kara, M., Sayıncı, B., Elkoca, E., Öztürk, İ., & Özmen, T. (2013). Seed size and shape analysis of registered common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars in Turkey using digital photography. *Tarım Bilimleri Dergisi – Journal of Agricultural Sciences*, 19(3), pp. 219-234.

- Leemans, V., Magein, H., & Destain, M. (2002). AE—Automation and emerging technologies: On-line fruit grading according to their external quality using machine vision. *Biosystems Engineering*, 83(4), pp. 397-404.
- Neto, J., Meyer, G., Jones, D., & Samal, A. (2006). Plant species identification using Elliptic Fourier leaf shape analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50, pp. 121-134.
- Rasband, W. (1997-2018). ImageJ 1.38x. Bethesda, Maryland, USA: U.S. National Institutes of Health. Retrieved from <http://rsb.info.nih.gov/ij>
- Saraçoğlu, T., & Akçakal, T. (2019). Elmanın bazı geometrik ve hidrodinamik özellikleri ile zedelenme parametrelerinin belirlenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 56(4), s. 465-474.
- Sayınacı, B., Ercisli, S., Akbulut, M., Şavşatlı, Y., & Baykal, H. (2015). Determination of shape in fruits of cherry laurel (*Prunus laurocerasus*) accessions by using Elliptic Fourier analysis. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 14(1), pp. 63-82.
- Sert, E., Taşkın, D., & Suçsuz, N. (2010). Görüntü işleme teknikleri ile şeftali ve elma sınıflandırma. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), s. 82-88.
- UNECE Standard FFV-50. (2020). *UNECE Standard FFV-50 concerning the marketing and commercial quality control of Apples*. https://unece.org/sites/default/files/2020-12/50_Apples.pdf adresinden alındı
- Yarılgaç, T., Uzun, S., Karakaya, O., Ateş, U., & Öztürk, B. (2023). Fruit characteristics of some standard apple cultivar/rootstock combination in Ordu ecology. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 40(2), s. 81-88.
- Yılmaz, D., & Bozkurt, K. (2019). Kurutmalık elma dilimleme makinası tasarımı ve prototipinin geliştirilmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(2), s. 194-200.
- Zhang, K. ..., Chu, P., Li, Z., & Lu, R. (2021). System design and control of an apple harvesting robot. *Mechatronics*, 78(102644).

BÖLÜM 13

KANSER ARAŞTIRMALARINDA BİTKİ SEKONDER METABOLİTLERİNİN ROLÜ VE ÖNEMİ

Dr. Hüseyin İZGÖRDÜ¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.16372864>

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Eskişehir, Türkiye.
huseyinizgordu@gmail.com, Orcid ID: 0000-0002-1377-2988

GİRİŞ

Kanser, dünya genelinde ölüm nedenlerinde en önde gelen sağlık problemlerinden biridir ve tedavisinde kullanılan mevcut yöntemler (cerrahi, kemoterapi, radyoterapi vb.) sıklıkla ciddi yan etkilere yol açmakta veya zamanla etkinliklerini yitirmektedir. Özellikle kemoterapide kullanılan ilaçlara karşı direnç gelişmesi, tedavinin başarısını kısıtlayan önemli bir sorundur. Bu nedenle, kanser hücrelerinde apoptoz (programlı hücre ölümü) mekanizmasının yeniden etkinleştirilmesi ve tümör büyümesinin çok yönlü hedeflenmesi güncel araştırmaların odağı haline gelmiştir. Bitkisel kaynaklı doğal bileşikler, yüksek biyoyararlanımları, görece güvenli profilleri, minimal yan etkileri ve maliyet-etkin olmaları nedeniyle kanserle mücadelede umut vadeden ajanlar olarak yoğun ilgi görmektedir (Abotaleb vd., 2018).

Bitki sekonder metabolitleri, bitkiler tarafından primer metabolizma dışında sentezlenen ve bitkiye hayatta kalma avantajları sağlayan küçük organik moleküllerdir. Bu bileşikler bitkinin büyüme ve gelişimi için hayati olmamakla birlikte, bitkileri herbivorlara ve patojenlere karşı korumak, UV radyasyonu gibi stres etmenlerine direnç sağlamak ve tozlaşma ya da tohum dağılımına katkıda bulunmak gibi işlevler üstlenirler. Tarihsel süreçte tıp alanında pek çok bitkisel metabolit keşfedilmiş ve ilaç olarak kullanılmıştır. Nitekim 1940-2014 yılları arasında onaylanan kanser kemoterapi ilaçlarının yaklaşık %49'unun doğal ürün kökenli olduğu rapor edilmiştir. Günümüzde de geliştirme aşamasındaki anti-kanser ilaçların %70'ine yakınının bitkisel kaynaklı olması, bilim dünyasının bu bileşiklere artan yönelimini ortaya koymaktadır. Bitki sekonder metabolitlerinin binlerce farklı türü bulunmakla birlikte, bunların anti-kanser etkileri gösteren başlıca grupları fenolik bileşikler (flavonoidler, polifenoller vb.), alkaloidler, terpenoidler, glukosinolat türevleri ve saponinler olarak sıralanabilir (Kabera vd., 2014; Panja ve Paul, 2024; Seca vd., 2018).

Sekonder metabolitlerin kanser araştırmalarındaki önemi, çok yönlü biyolojik etkilerinden kaynaklanır. Bu moleküller kanser hücrelerinin proliferasyonunu (çoğalmasını) engelleyebilir, anormal sinyal iletim yollarını modüle edebilir, apoptozu tetikleyebilir ve anjiyogenezi (tümör damarlanması) baskılayabilir. Örneğin bitki kaynaklı birçok bileşik, MAPK, EGFR, VEGF, Ras/Raf, NF- κ B gibi kanser gelişiminde kilit rol oynayan sinyal yollarını inhibe edebilmekte; hücre döngüsünü durdurarak tümör büyümesini

yavaşlatmakta ve kaspaz enzimlerini etkinleştirerek kanser hücrelerinde kontrollü ölümü başlatmaktadır. Ayrıca bu doğal bileşiklerin bazıları, tümör invazyonunu ve metastazını engelleyebilecek şekilde matriks metalloproteinazları (MMP'leri) azaltmak, epitel-mezenkimal geçişi (EMT) tersine çevirmek veya tümör mikroçevresindeki enflamasyonu baskılamak gibi etkiler gösterebilir. Bunun yanı sıra, antioksidan özellikleriyle DNA hasarını önleyerek kanser başlangıcını geciktirebilecekleri gibi, doğrudan kanser hücresinde reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırarak pro-oksidan etkiyle hücre ölümüne de yol açabilirler. Özetle, bitkisel sekonder metabolitler sahip oldukları geniş etki spektrumu sayesinde hem kemopreventif (kanseri önleyici) hem de kemoterapötik (tedavi edici) potansiyele sahip olmalarıyla kanser araştırmalarında kritik bir konumdadır (Jamal vd., 2025; Panja ve Paul, 2024).

1. Flavonoidlerin Anti-Kanser Etkileri

Flavonoidler, bitkiler aleminde yaygın olarak bulunan ve fenolik yapıda olan büyük bir bileşik grubudur. Meyve, sebze, çay ve şarap gibi gıdalarda bolca bulunan flavonoidler, güçlü antioksidan ve antienflamatuar etkileriyle bilinirler. Son yıllarda flavonoidlerin belirgin anti-kanser özellikler sergilediği ve sitotoksik kemoterapötiklere benzer şekilde kanser hücrelerinde apoptozu tetiklediği gösterilmiştir. Bu bileşikler hücre sinyal yollarını çoklu düzeylerde etkileyerek kanser gelişimini engelleyebilir. Örneğin quercetin (bir flavonol, soğan ve elmada bulunur) ve apigenin (bir flavon, papatya ve maydanozda bulunur) gibi flavonoidler, tümör hücrelerinde kaspaz aracılı hücre ölümünü indükleyip Bcl-2 gibi anti-apoptotik proteinlerin düzeyini düşürerek mitokondriyal yoldan apoptoz başlatmaktadır. Quersetin'in kolon kanseri hücrelerinde hücre döngüsünü G2/M fazında durdurduğu, p53 ve p21 gibi tümör baskılayıcıları aktifleştirip CDK enzimlerini baskılayarak çoğalmayı engellediği rapor edilmiştir. Benzer şekilde kaempferol, luteolin ve myricetin gibi diğer flavonoidler de farklı kanser hücre hatlarında hücre döngüsünü durdurarak ve apoptozu tetikleyerek antitümör etkiler göstermiştir (Abotaleb vd., 2018; Pandey vd., 2025).

Flavonoidlerin bir diğer önemli etkisi, metastaz ve anjiyogenez basamaklarını hedef almalarıdır. Çeşitli flavonoidlerin kanser hücrelerinin invazyon ve göç yeteneğini azaltarak metastatik yayılımı engellediği gösterilmiştir. Örneğin astragalın (Astragalus ve bazı bitkilerde bulunan bir

flavonoid), mide kanseri hücrelerinde MMP-2 ve MMP-9 enzimlerinin ekspresyonunu düşürerek hücre invazyonunu baskılamıştır; ayrıca NF- κ B sinyal yolunu inhibe ederek iltihabi yanıtı azaltmış ve tümör mikroçevresini kanser aleyhine çevirmiştir (Yang et al. 2021). Flavonoidler VEGF gibi anjiyojenik faktörlerin üretimini de düşürebilir. Genistein ve daidzein gibi soya izoflavonlarının, meme ve prostat kanseri hücrelerinde yeni kan damarı oluşumunu tetikleyen VEGF sinyalini baskıladığı ve aynı zamanda östrojen reseptörlerine bağlanarak hormon-duyarlı tümörlerde endojen östrojenin uyarıcı etkisini azalttığı bilinmektedir. Nitekim genistein, fitoöstrojen etkisiyle meme kanseri hücrelerinde proliferasyonu engelleyebilmektedir (Riaz vd., 2018).

Yeşil çayda bol bulunan epigallokateşin-3-gallat (EGCG) da güçlü bir flavonoiddir ve anti-kanser etkileri kapsamlı biçimde araştırılmıştır. EGCG, hücre siklusunu durdurma, apoptozu indüksiyonu ve metastazın önlenmesi gibi çok yönlü faaliyet gösterir. Örneğin EGCG'nin deneysel çalışmalarda meme ve prostat kanseri hücre hatlarında NF- κ B ve Akt sinyallerini inhibe ederek hem hücre çoğalmasını durdurduğu hem de kaspaz bağımlı apoptotik ölümü tetiklediği gösterilmiştir. Ayrıca EGCG, tümör hücre yüzeyindeki adezyon moleküllerini ve proteazları modüle ederek invazyonu azaltabilmekte, tümör endotelial hücrelerinde ise VEGF yolu üzerinden anjiyogenezi engelleyebilmektedir. Klinik açıdan da yeşil çay polifenollerinin kanser önleme potansiyeli üzerinde durulmaktadır; bazı faz II çalışmalar, yeşil çay ekstresinin prostat kanseri gelişme riskini yüksek kişilerde kemopreventif etki gösterebildiğini işaret etmektedir (Jamal vd., 2025; Zeng vd., 2017).

Özetle, flavonoidler antioksidan kapasiteleriyle DNA'yı korumaktan ziyade, kanser hücrelerinde prooksidan ve sinyal bozucu etkilerle hücre ölümünü uyarırlar. İltihap giderici özellikleriyle tümör mikroçevresindeki enflamasyonu azaltır; bu da hem kanser gelişimini yavaşlatır hem de metastaz yolunu kapatır. Flavonoidlerin kemoterapi ilaçlarıyla birlikte kullanımının sinerjik etkiler yaratabileceği de bildirilmiştir. Klinik çalışmalar, kuersetin, kateşinler ve kurkumin gibi polifenollerin kemoterapiye dirençli tümör hücrelerini ilaca hassas hale getirebildiğini ve klasik tedavinin etkinliğini artırabildiğini göstermektedir. Bu yönleriyle flavonoidler, kanser tedavisine destek olabilecek güçlü adaylar olarak değerlendirilmektedir.

2. Terpenoidlerin Anti-Kanser Etkileri

Terpenoidler (izoprenoidler olarak da bilinir), bitkilerin uçucu yağlarında, reçinelerinde ve pigmentlerinde yaygın bulunan, izopren birimlerinden oluşan çok geniş bir doğal madde sınıfıdır. Monoterpenlerden (10 karbonlu) steroid yapıdaki triterpenlere (30 karbonlu) kadar uzanan terpenoid ailesi, anti-kanser etkinlik açısından birbirinden ilginç bileşikler içerir. Modern onkolojide başarı kazanmış en önemli terpenoidlerden biri, Pasifik porsuk ağacından (*Taxus brevifolia*) elde edilmiş olan paklitaksel adlı diterpenoiddir. Paklitaksel (ticari adı Taxol®), karmaşık yapılı bir molekül olup 1993'te onaylanmasından bu yana özellikle meme, yumurtalık ve akciğer kanseri gibi birçok kanser türünün tedavisinde çığır açmıştır. Etki mekanizması, vinkristinin aksine mikrotübüllerin aşırı stabilizasyonuna dayanır; paklitaksel β -tübülün alt birimine bağlanarak mikrotübüllerin dinamik olarak depolimerize olmasını engeller ve bu şekilde mitozun anafaza ilerlemesini durdurur. Sonuçta hücreler bölünme aşamasında takılı kalır ve apoptotik yıkım gerçekleşir. Paklitakselin bu güçlü etkisi sayesinde ileri evre kanserlerde tümör yükünün azaltılması ve hastaların yaşam sürelerinin uzatılması sağlanmıştır. Paklitakselin yarı sentetik türevi olan dosetaksel de benzer mekanizma ile etki ederek özellikle meme ve prostat kanserlerinde standart tedavi haline gelmiştir (Seca ve Pinto, 2018; De Morree vd., 2016)

Terpenoidlerin anti-kanser portföyü sadece paklitaksel ile sınırlı değildir. Artemisinin ve türevleri (ör. artesunat), aslında sıtma ilacı olarak bilinen seskiterpen lakton yapısında bileşiklerdir; fakat yüksek demir içeren kanser hücrelerinde ROS üretimini tetikleyerek ve mitokondriyel zar potansiyelini bozarak seçici toksisite gösterebildikleri keşfedilmiştir. Artemisinin'in özellikle lösemi ve kolon kanseri hücrelerinde apoptoz ve otofaji indüksiyonuyla öldürücü etki yaptığı prelinik çalışmalarda gözlenmiştir. Bir diğer monoterpen olan d-limonen, turuncgil kabuklarında bulunan bir bileşiktir ve meme kanseri dahil bazı kanser türlerinde kemopreventif potansiyeli nedeniyle faz I klinik çalışmalarda değerlendirilmiştir. Günde 2 gram ve üzeri dozlarda d-limonen verilen ileri evre kanser hastalarında, ilacın iyi tolere edildiği ve bazı hastalarda hastalık stabilizasyonu sağladığı rapor edilmiştir. Ayrıca d-limonen'in meme dokusunda siklin D1 düzeylerini düşürerek hücre döngüsünü G1 fazında durdurabileceği, insan meme kanseri hastalarından elde edilen biyopsi

örneklerinde gösterilmiştir. Bu bulgular, diyetle de alınabilen terpenoidlerin kemopreventif etkilerini anlamak açısından önemlidir (Miller vd., 2013; Bardon vd., 1998).

Terpenoidlerin önemli bir boyutu da, kemoduyarlastırıcı etkilerinin olmasıdır. Birçok lipofilik terpenoid, kanser hücrelerinde P-glikoprotein gibi ilaç atım pompalarının substratı olarak onlarla yarışır ve bu pompaları inhibe ederek diğer kemoterapötiklerin hücre içinde daha uzun süre kalmasına yardımcı olur. Örneğin β -karoten ve likopen gibi karotenoid terpenler, doğrudan tümör hücrelerini öldürmekten ziyade, antioksidan etkileriyle DNA hasarını azaltıp sağlıklı hücreleri koruyarak tedaviyi destekleyebilir. Bununla birlikte, β -elemen ve farnasol gibi bazı uçucu yağ terpenleri de çoklu ilaç dirençli kanser hücrelerinde ilaca duyarlılığı artırıcı etkiler göstermiştir (Wink vd., 2012).

Sonuç olarak terpenoidler, yapısal çeşitlilikleri sayesinde bir yandan mitoz, apoptoz ve anjiyogenez gibi süreçleri doğrudan hedef alırken diğer yandan kemoterapiye yardımcı olarak tümör hücrelerinin ilaca cevabını güçlendirebilmektedir. Klinik kullanımda başarı kazanmış (paklitaksel gibi) örneklerin yanı sıra, halen araştırma aşamasında olan pek çok terpenoid türevi de geleceğin anti-kanser ilaç adayları olarak değerlendirilmektedir.

3. Polifenoller ve Diğer Fenolik Bileşikler

Polifenoller, bir veya daha fazla aromatik halkada çoklu hidroksil grupları içeren bitki kaynaklı bileşikler olup, flavonoidleri de içeren geniş bir gruptur. Kurkumin, resveratrol, epigallokateşin gibi polifenoller, son yıllarda kanser biyolojisinde en çok ilgi gören moleküllerdendir. Bu bileşiklerin ortak özelliği, çoklu hücresel hedefleri aynı anda etkileyebilmeleri ve dolayısıyla kanserin farklı aşamalarına müdahale edebilmeleridir.

Kurkumin, zerdeçal (*Curcuma longa*) kökünden elde edilen sarı renkli bir polifenolik kurkuminoiddir. Yüzyıllardır geleneksel tıpta anti-enflamatuvar amaçla kullanılan zerdeçalın etkin bileşiği olan kurkuminin, aynı zamanda güçlü bir anti-kanser ajan olduğu ortaya konmuştur. Kurkumin, kansere karşı kemopreventif, kemoterapötik ve kemoduyarlastırıcı etkiler sergiler (Kocaadam ve Şanlier, 2017). Moleküler düzeyde kurkuminin etki mekanizmaları son derece çeşitlidir ve bu çok yönlülük onu benzersiz kılmaktadır. Yapılan kapsamlı çalışmalar, kurkuminin kanser ilişkili pek çok

hedef veya yolak üzerinde düzenleyici etkisi olduğunu göstermiştir (Yang vd., 2017). İlk olarak kurkumin, hücreyi toksinlerden arındıran faz II detoksifikasyon enzimlerini (örn. glutatyon-S-transferazları) Nrf2 transkripsiyon faktörünü aktive ederek artırır; bu da karsinogen oluşumunu engelleyici bir rol oynar. İkinci olarak, kurkumin mitoz sırasında hatalı bölünmelere yol açan bir mitotik felaket indüksiyonu yapar; bu, kanser hücrelerinde kaspaz aktivasyonu ve mitokondriyel membran depolarizasyonu ile ilişkili bulunmuştur. Üçüncü olarak, kurkumin otofojik hücre ölümünü tetikleyebilir; özellikle apoptoza dirençli kanser hücrelerinde Beclin-1 bağımlı ve bağımsız yollarla otofaji başlatarak bu hücreleri öldürebilir. Dördüncü önemli mekanizması, hücre döngüsünün çeşitli kontrol noktalarında (G1/S ve G2/M) tutuklanmasıdır; kurkumin, siklin bağımlı kinaz inhibitörlerini (p21^{Cip1}, p27^{Kip1}) yukarı regüle ederek ve siklin/CDK komplekslerini baskılayarak hücre çoğalmasını durdurur. Beşinci olarak, kurkumin enflamasyon ve hayatta kalma yollarının kilit düzenleyicisi NF- κ B'yi inhibe eder; NF- κ B'nin nükleusa translokasyonunu engelleyip DNA'ya bağlanma kapasitesini azaltarak kemoterapi direncine yol açan genlerin ifadesini baskılar. Altıncı olarak, kurkumin anjiyogenezin kilit basamaklarını engeller; PDGF, VEGF ve b-FGF gibi büyüme faktörlerinin ekspresyonunu azaltır ve MMP-2, MMP-9 gibi ekstra-selüler matriks yıkıcı enzimleri aşağı regüle eder. Bu anti-anjiyogenik etki, ERK, MAPK, PKC ve PI3K/Akt gibi çok sayıda sinyal yolunun kurkumin tarafından inhibe edilmesiyle gerçekleşir (Seca ve Pinto, 2018). Son olarak bazı çalışmalar, kurkuminin doğrudan DNA'ya bağlanarak ve mikrotübül polimerizasyonunu zayıflatarak da sitotoksik etki gösterebileceğini öne sürmüştür. Bütün bu mekanizmalar bir arada düşünüldüğünde, kurkumin adeta “çoklu silahı” olan bir molekül gibi davranmakta ve kanser hücresinin yaşam döngüsünün farklı noktalarını hedef almaktadır (Fu vd., 2015; Ramya vd., 2017; Haris vd., 2017).

Polifenol grubunun bir diğer yıldızı resveratrol'dür. Resveratrol, üzüm kabuğu, yer fıstığı, dut ve kırmızı şarapta bulunan bir stilben türevidir. İlk olarak Fransız paradoksu (Fransa'da yüksek yağ tüketimine rağmen düşük kalp hastalığı riski) araştırmalarıyla kardiyovasküler faydaları dikkat çeken resveratrolün, kanserde de çok yönlü yararlar sağladığı anlaşılmıştır. Resveratrol, kanser hücrelerinin büyümesini azaltıp çoğalmasını

engelleyerek hücre döngüsünü durdurmakta, apoptozu aktive etmekte ve anjiyogenez ile metastaz süreçlerini baskılamaktadır. Örneğin resveratrol, çeşitli kanser hücrelerinde S ve G2/M fazında döngü tutuklanmasına yol açar; bunun altında yatan mekanizmalar arasında CDK ve siklin düzeylerinin düşürülmesi, tümör baskılayıcı genlerin (p53, p21) aktiflenmesi yer alır. Aynı zamanda resveratrol, kaspaz ailesini tetikleyerek ve mitokondride sitokrom c salınımını artırarak hücre içi ölüm programlarını devreye sokar. Bu bileşiğin kronik inflamasyonu da giderdiği, COX-2 ve NF- κ B gibi medyatörleri baskıladığı için tümör mikroçevresini daha elverişsiz hale getirdiği rapor edilmiştir. Resveratrolün kanser kök hücrelerini hedef alabildiği ve bu sayede tedaviye direnç ve nüks ihtimalini azaltabileceği yönünde bulgular da mevcuttur. Dahası, tümör stromasını (mikroçevresini) modüle ederek immün yanıtı güçlendirdiği ve tümörün destekleyici ortamını bozduğu ileri sürülmektedir. Bütün bu etkiler göz önüne alındığında resveratrol, tek başına doğrudan tümör küçültücü etkileri yanında kemoterapiye duyarlılığı artıran, metastazı engelleyen ve kanserin sistemik yönlerini hedef alan bir adjuvan olarak değerlendirilmektedir. Nitekim resveratrolün standart kemoterapötiklerle kombinasyonunun, tedavinin etkinliğini artırıp yan etkileri azaltabileceği düşünülmektedir. Ancak resveratrol için de biyoyararlanım sorunları söz konusudur; vücutta hızlı metabolize olup atılması, plazma düzeylerinin düşük kalmasına yol açar. Bu nedenle resveratrolün klinikte yararını netleştirmek için formülasyon geliştirme ve yüksek doz tolerabilitesi üzerine çalışmalar sürmektedir (Anwar vd., 2023; Kursvietiene vd., 2023).

Bu fenolik bileşikler gerek hücre kültürü ve hayvan modellerinde, gerekse sınırlı da olsa insan çalışmalarında umut vadeden sonuçlar üretmiştir. Örneğin ellagik asit türevlerinin kolon kanseri poliplerini küçültebildiği, antosiyanin içeriği yüksek diyetel müdahalelerin yemek borusu kanseri riskini azalttığı yönünde epidemiyolojik veriler bulunmaktadır. Tüm bu veriler, polifenollerin hem kanser oluşumunu engellemede hem de tedavide destekleyici olarak önemli rol oynayabileceğini göstermektedir.

4. Glukosinolat Türevleri ve Anti-Kanser Etkileri

Glukosinolatlar, turpgiller (Brassicaceae) familyasındaki brokoli, karnabakar, lahana, tere gibi sebzelerde bol bulunan kükürt ve azot içeren sekonder metabolitlerdir. Tek başlarına biyolojik olarak genellikle inert olan bu

bileşikler, bitkide bulunan miyrosinaz enzimiyle etkileşime girdiklerinde aktif izotiyosiyanatlara dönüşürler. En çok çalışılan glukosinolat türevi, brokoli filizlerinde yüksek oranda bulunan glukorafanın molekülünün enzimatik hidroliziyle oluşan sülforafan (SFN) adlı izotiyosiyanattır. Sülforafan, hem kanser kemoprevensiyonu hem de tedavisi açısından geniş çaplı araştırmalara konu olmuştur (Liu vd., 2024).

Sülforafanın kanser karşıtı etkileri, çok boyutlu mekanizmalara dayanır. **İlk olarak**, SFN vücutta faz II detoksifikasyon enzimlerini kuvvetle indükler; örneğin glutatyon S-transferaz ve kinon redüktaz gibi enzimlerin seviyesini artırarak kanserojen maddelerin zararsız hale getirilmesini hızlandırır. Bu özellik, sülforafana bir anti-inisiyasyon (kansere başlatıcı etkenleri etkisizleştirme) gücü verir. **İkinci olarak**, SFN doğrudan tümör hücrelerine etki ederek proliferasyonlarını engeller ve hücre döngüsünü durdurur. Çok sayıda çalışma, sülforafanın çeşitli kanser hücre hatlarında G1 ve G2/M kontrol noktalarında hücre döngüsünü bloke ettiğini göstermiştir (Asif vd., 2023). Örneğin SFN, insan meme kanseri hücrelerinde G2/M fazında birikim ve ardından apoptoz ile sonuçlanan etki yapmıştır; bu süreçte p53'ün ve siklin bağımlı kinaz inhibitörlerinin (p21 gibi) devreye girdiği gösterilmiştir (Allison vd., 2007). **Üçüncü olarak**, sülforafan güçlü bir apoptoz indükleyicisidir. Hem intrinsik (mitokondri aracılı) hem de ekstrinsik (ölüm reseptörü aracılı) apoptotik yollardan hücreleri ölüme sürükleyebilir. SFN'nin prostat ve kolon kanseri hücrelerinde kaspaz-8 ve kaspaz-3 gibi kilit enzimleri aktive ederek apoptotik yıkıma yol açtığı bildirilmiştir. Ayrıca SFN'nin HDAC (histondeasetilaz) enzimlerini inhibe ederek tümör baskılayıcı genlerin (ör. p21^{Cip1}) yeniden ifade edilmesini sağladığı, böylece hücre döngüsü durdurma ve apoptoza zemin hazırladığı gösterilmiştir. **Dördüncü olarak**, sülforafan anjiyogenezi engelleyebilir. Endotel hücreleri üzerinde yapılan deneylerde SFN'nin türevlerinin yeni damar oluşumunu tetikleyen sinyalleri (VEGF vb.) azalttığı, tümör hücrelerinin salgıladığı anjiyojenik faktörlerin etkisini kısıtladığı saptanmıştır. **Beşinci önemli etkisi**, SFN'nin kanser kök hücre popülasyonunu hedef alabilmesidir. Özellikle meme kanseri ve pankreas kanseri modellerinde düşük doz sülforafanın kök hücre benzeri tümör hücrelerini farklılaştırarak veya öldürerek tümörün tekrarlama potansiyelini azalttığı rapor edilmiştir. **Son olarak**, sülforafan kemoterapötik ilaçlarla

sinerjistik etki gösterebilir. Örneğin sisplatin veya doksorubisin gibi ilaçlarla birlikte verildiğinde, kanser hücrelerinde ilacın etkisini artırdığı ve ilaç direnciyle ilişkili bazı yolakları (örn. NF- κ B aktivasyonunu) baskıladığı belirlenmiştir (Fazliev vd., 2023; Su vd., 2018; Coutinho vd., 2023). Bu gibi bulgular, glukosinolat türevlerinin hem kansere yakalanmayı önlemede hem de tedavide ilaçlara yardımcı olmada değerli olabileceğini göstermektedir.

5. Saponinlerin Anti-Kanser Etkileri

Saponinler, glikozil edilmiş triterpenoid veya steroid yapılı bileşikler olup, adlarını sabun benzeri köpürtücü özelliklerinden alırlar. Birçok tıbbi bitkinin (Ginseng, meyan kökü, at kestanesi, soya fasulyesi vb.) bünyesinde saponinler bulunur ve bunlar hem halk hekimliğinde hem de modern araştırmalarda çeşitli farmakolojik etkileriyle incelenmiştir. Son yıllarda saponinlerin anti-tümör potansiyeli üzerinde yoğunlaşmış ve farklı tipte saponinlerin kanser hücrelerinde sitotoksik etki gösterdiği bulunmuştur (Podolak vd., 2023).

β -eskulin (aescin), at kestanesi (*Aesculus hippocastanum*) tohumlarından elde edilen karışık bir triterpen saponin grubudur. Aescin üzerinde yapılan kapsamlı incelemeler, bu bileşiğin apoptoz indüksiyonu, proliferasyonun azaltılması ve metastazın engellenmesi şeklinde üç temel anti-kanser mekanizmaya sahip olduğunu ortaya koymuştur (Chen-Li vd., 2018). Hem *in vitro* kanser hücresi çalışmalarında hem de *in vivo* tümör modellerinde aescin, 15'ten fazla kanser türünde tümör büyümesini baskılamış veya başlamasını önlemiştir. Aescin'in moleküler düzeyde, kanser hücrelerinde mitokondriyel yolu hedefleyerek intrinsik apoptozu tetiklediği; hücre içi ROS birikimine ve DNA hasarına yol açarak programlı hücre ölümünü aktive ettiği saptanmıştır. Aynı zamanda aescin'in ölüm reseptörü (ekstrinsik) yolunu da uyarabildiğine dair bulgular vardır. Bu sayede, aescin verilmiş kanser hücrelerinde kaspaz-8 ve kaspaz-3 düzeylerinin yükseldiği, PARP parçalanmasının arttığı ve mitokondriyel membran potansiyelinin çöktüğü gözlemlenmiştir. İlginç olarak, aescin NF- κ B'yi inhibe edip anti-apoptotik Bcl-2 ailesi proteinlerinin düzeyini azalttığından, kanser hücrelerini ölüm sinyallerine daha duyarlı hale getirmektedir. Ayrıca aescin'in bazı kanser hücrelerinde otofojiyi de indükleyebildiği ve bu yolla da hücre ölümüne katkı sunduğu belirtilmektedir. Proliferasyon üzerine etkisine bakıldığında, aescin'in hücre döngüsü

düzenleyici proteinleri (ör. siklinler ve CDK'ler) baskılayarak kanser hücrelerinin bölünmesini yavaşlattığı görülmüştür. Metastaz engelleme açısından ise aescin, deneysel çalışmalarda kanser hücrelerinin diğer dokulara göçünü azaltmış; bunun olası mekanizması olarak MMP-9 ve VEGF gibi metastaz ve anjiyogeneze katkı veren moleküllerin ekspresyonunu düşürdüğü gösterilmiştir (Fazliev vd., 2023; Omi vd., 2021; Kenny vd., 2021).

6. SONUÇ

Bitki sekonder metabolitleri, kanser araştırmaları ve tedavi stratejileri açısından vazgeçilmez bir hazine sunmaktadır. Flavonoidler, alkaloidler, terpenoidler, polifenoller, glukosinolat türevleri ve saponinler gibi farklı gruplardan sayısız bileşik, laboratuvar ortamında kanser hücrelerini öldürmede, tümör büyümesini yavaşlatmada veya metastazı engellemede başarılı sonuçlar vermiştir. Hatta bazıları (paklitaksel, vinkristin gibi) klinik kullanıma girerek milyonlarca hastanın yaşam süresine ve kalitesine doğrudan katkı sağlamıştır. Güncel veriler, geliştirilme aşamasındaki anti-kanser ilaçların önemli bir kısmının bitkisel kaynaklı olduğunu vurgulamaktadır (Panja ve Paul, 2024). Bu durum, gelecekte yeni kanser ilaçlarının keşfinde de doğanın kilit rol oynayacağına işaret etmektedir.

Bitkisel sekonder metabolitlerin anti-kanser etkilerinin altında yatan mekanizmalar, diğer pek çok ilaçta görülmeyen bir çeşitlilik ve eşzamanlılık arz etmektedir. Tek bir molekülün hem apoptoz indükleyip hem anjiyogenezi engelleyebilmesi, ya da hem bağışıklığı güçlendirip hem de tümör hücrelerini doğrudan öldürebilmesi, bu doğal ürünleri eşsiz kılmaktadır. Bununla birlikte, laboratuvar ve hayvan çalışmalarında elde edilen bu umut vaat edici sonuçları insan klinik pratiğine aktarırken dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Birçok doğal bileşik, düşük çözünürlük veya sınırlı biyoyararlanım gibi farmakokinetik engellere sahiptir; bu da etkili dozların insan vücudunda sağlanmasını güçleştirebilir. Ayrıca, bitkisel ekstraktların ve bileşiklerin standardizasyonu, etkinlik ve güvenlik sınırlarının netleştirilmesi gerekmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için nanopartikül taşıyıcı sistemler, yapısal türev geliştirme ve kombinasyon tedavileri gibi yaklaşımlar üzerinde durulmaktadır (Kumar vd., 2016; Yao vd., 2017; Jamal vd., 2025).

Tüm bu değerlendirmenin ışığında, bitki sekonder metabolitlerinin kanserdeki rolü iki temel düzeyde özetlenebilir: Birincisi, yeni ilaç keşfi ve

geliştirilmesi için zengin bir kaynak olmaları; ikincisi ise, hali hazırda bilinen bileşiklerin tamamlayıcı/yardımcı tedavi olarak kullanılıp konvansiyonel tedavilerin etkinliğini artırma potansiyeli. Hem önleyici hem de tedavi edici alanda bu bileşiklerden daha fazla faydalanmak için multidisipliner araştırmaların sürdürülmesi elzemdir. Önümüzdeki yıllarda yapılacak kapsamlı klinik çalışmalar ve inovatif ilaç taşıyıcı sistemlerin devreye girmesiyle, kurkumin ve resveratrol gibi popüler bileşiklerin ya da henüz adı geniş kitlelerce duyulmamış nice sekonder metabolitin, kanserle mücadelede standart tedaviler arasına girmesi hedeflenmektedir. Sonuç olarak, doğa eczanesinin ürünleri olan bitki sekonder metabolitleri, kanser biyolojisinin daha iyi anlaşılmasında ve daha etkili, güvenli tedavilerin geliştirilmesinde kritik önemde olmayı sürdürecektir.

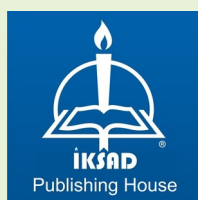
KAYNAKÇA

- Abotaleb, M., Samuel, S. M., Varghese, E., Varghese, S., Kubatka, P., Liskova, A., & Büsselberg, D. (2018). Flavonoids in cancer and apoptosis. *Cancers*, 11(1), 28.
- Pledgie-Tracy, A., Sobolewski, M. D., & Davidson, N. E. (2007). Sulforaphane induces cell type-specific apoptosis in human breast cancer cell lines. *Molecular Cancer Therapeutics*, 6(3), 1013–1021.
- Anwar, M. J., Altaf, A., Imran, M., Amir, M., Alsagaby, S. A., Abdulmonem, W. A., ... Abdelgawad, M. A. (2023). Anti-cancer perspectives of resveratrol: A comprehensive review. *Food and Agricultural Immunology*, 34(1).
- Ali, A. M., Khan, N., Kaleem, N., Ahmad, W., Alharethi, S. H., Alharbi, B., ... Sharifi-Rad, J. (2023). Anticancer properties of sulforaphane: Current insights at the molecular level. *Frontiers in Oncology*, 13, 1168321.
- Bardon, S., Picard, K., & Martel, P. (1998). Monoterpenes inhibit cell growth, cell cycle progression, and cyclin D1 gene expression in human breast cancer cell lines. *Nutrition and Cancer*, 32(1), 1–7.
- Cheng, C.-L., Chao, W.-T., Li, Y.-H., Ou, Y.-C., Wang, S.-S., Chiu, K.-Y., & Yuan, S.-Y. (2018). Escin induces apoptosis in human bladder cancer cells: An in vitro and in vivo study. *European Journal of Pharmacology*, 840, 79–88.
- Coutinho, L. d. L., Junior, T. C. T., & Rangel, M. C. (2023). Sulforaphane: An emergent anti-cancer stem cell agent. *Frontiers in Oncology*, 13, 1089115.
- De Morrée, E., van Soest, R., Aghai, A., de Ridder, C., de Bruijn, P., Ghobadi Moghaddam-Helmantel, I., ... van Weerden, W. (2016). Understanding taxanes in prostate cancer: Importance of intratumoral drug accumulation. *The Prostate*, 76(10), 927–936.
- Fazliev, S., Tursunov, K., Razzokov, J., & Sharipov, A. (2023). Escin's Multifaceted Therapeutic Profile in Treatment and Post-Treatment of Various Cancers: A Comprehensive Review. *Biomolecules*, 13(2), 315.
- Fu, Z., Chen, X., Guan, S., Yan, Y., Lin, H., & Hua, Z. C. (2015). Curcumin inhibits angiogenesis and improves defective hematopoiesis induced by

- tumor-derived VEGF in tumor model through modulating VEGF-VEGFR2 signaling pathway. *Oncotarget*, 6(23), 19469–19482.
- Haris, P., Mary, V., Aparna, P., Dileep, K. V., & Sudarsanakumar, C. (2017). A comprehensive approach to ascertain the binding mode of curcumin with DNA. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy*, 175, 155–163.
- Jamal, A., Arif, A., Shahid, M. N., Kiran, S., & Batool, Z. (2025). Plant Secondary Metabolites Inhibit Cancer by Targeting Epidermal Growth Factor Receptor (EGFR): An Updated Review on their Regulation and Mechanisms of Action. *Asian Pacific Journal of Cancer Biology*, 10(1), 191-206.
- Kabera, J. N., Semana, E., Mussa, A. R., & He, X. (2014). Plant secondary metabolites: Biosynthesis, classification, function and pharmacological properties. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2, 377–392.
- Kenny, H. A., Hart, P. C., Kordylewicz, K., Lal, M., Shen, M., Kara, B., Chen, Y. J., Grassl, N., Alharbi, Y., Pattnaik, B. R., Watters, K. M., Patankar, M. S., Ferrer, M., & Lengyel, E. (2021). The Natural Product β -Escin Targets Cancer and Stromal Cells of the Tumor Microenvironment to Inhibit Ovarian Cancer Metastasis. *Cancers*, 13(16), 3931.
- Kocaadam, B., & Şanlier, N. (2017). Curcumin, an active component of turmeric (*Curcuma longa*), and its effects on health. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(13), 2889–2895.
- Kumar, G., Mittal, S., Sak, K., & Tuli, H. S. (2016). Molecular mechanisms underlying chemopreventive potential of curcumin: Current challenges and future perspectives. *Life sciences*, 148, 313–328.
- Kursvietiene, L., Kopustinskiene, D. M., Staneviciene, I., Mongirdiene, A., Kubová, K., Masteikova, R., & Bernatoniene, J. (2023). Anti-Cancer Properties of Resveratrol: A Focus on Its Impact on Mitochondrial Functions. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 12(12), 2056.
- Liu, P., Zhang, B., Li, Y., et al. (2024). Potential mechanisms of cancer prevention and treatment by sulforaphane, a natural small molecule compound of plant-derived. *Molecular Medicine*, 30, 94.
- Miller, J. A., Lang, J. E., Ley, M., Nagle, R., Hsu, C. H., Thompson, P. A., Cordova, C., Waer, A., & Chow, H. H. (2013). Human breast tissue

- disposition and bioactivity of limonene in women with early-stage breast cancer. *Cancer prevention research (Philadelphia, Pa.)*, 6(6), 577–584.
- Omi, K., Matsuo, Y., Ueda, G., Aoyama, Y., Kato, T., Hayashi, Y. ... Takiguchi, S. (2021). Escin inhibits angiogenesis by suppressing interleukin-8 and vascular endothelial growth factor production by blocking nuclear factor- κ B activation in pancreatic cancer cell lines. *Oncology Reports*, 45, 55.
- Pandey P, Lakhanpal S, Mahmood D, Kang HN, Kim B, Kang S, Choi J, Choi M, Pandey S, Bhat M, Sharma S, Khan F, Park MN and Kim B (2025) An updated review summarizing the anticancer potential of flavonoids via targeting NF- κ B pathway. *Front. Pharmacol.* 15:1513422.
- Panja, A., & Paul, S. (2024). Plant Secondary Metabolites in Cancer Treatment: A Mini Review. *Open Access Journal of Microbiology and Biotechnology*, 9(2), 1-4.
- Podolak, I., Grabowska, K., Sobolewska, D., et al. (2023). Saponins as cytotoxic agents: An update (2010–2021). Part II—Triterpene saponins. *Phytochemistry Reviews*, 22, 113–167.
- Riaz, A., Rasul, A., Hussain, G., Zahoor, M. K., Jabeen, F., Subhani, Z., et al. (2018). Astragalin: a bioactive phytochemical with potential therapeutic activities. *Adv. Pharmacol. Sci.* 2018, 9794625.
- Seca, A. M. L., & Pinto, D. C. G. A. (2018). Plant Secondary Metabolites as Anticancer Agents: Successes in Clinical Trials and Therapeutic Application. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(1), 263.
- Sri Ramya, P. V., Angapelly, S., Guntuku, L., Singh Digwal, C., Nagendra Babu, B., Naidu, V. G. M., & Kamal, A. (2017). Synthesis and biological evaluation of curcumin inspired indole analogues as tubulin polymerization inhibitors. *European journal of medicinal chemistry*, 127, 100–114.
- Su, X., Jiang, X., Meng, L., Dong, X., Shen, Y., & Xin, Y. (2018). Anticancer Activity of Sulforaphane: The Epigenetic Mechanisms and the Nrf2 Signaling Pathway. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2018, 5438179.
- Wink M, Ashour ML and El-Readi MZ (2012). Secondary metabolites from plants inhibiting ABC transporters and reversing resistance of cancer

- cells and microbes to cytotoxic and antimicrobial agents. *Front. Microbio.* **3**:130.
- Yang, C., Ma, X., Wang, Z., Zeng, X., Hu, Z., Ye, Z., & Shen, G. (2017). Curcumin induces apoptosis and protective autophagy in castration-resistant prostate cancer cells through iron chelation. *Drug design, development and therapy*, *11*, 431–439.
- Yang, M., Li, W. Y., Xie, J., Wang, Z. L., Wen, Y. L., Zhao, C. C., et al. (2021). Astragaloside inhibits the proliferation and migration of human colon cancer HCT116 cells by regulating the NF- κ B signaling pathway. *Front. Pharmacol.* *12*, 639256.
- Yao, H., Liu, J., Xu, S., Zhu, Z., & Xu, J. (2017). The structural modification of natural products for novel drug discovery. *Expert opinion on drug discovery*, *12*(2), 121–140.
- Zeng, L., Yan, J., Luo, L. *et al.* Preparation and characterization of (–)-Epigallocatechin-3-gallate (EGCG)-loaded nanoparticles and their inhibitory effects on Human breast cancer MCF-7 cells. *Sci Rep* **7**, 45521 (2017).



ISBN: 978-625-378-279-5