

TARIM, ÇEVRE VE İKLİM EKSENİNDE

GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE ARAŞTIRMALAR-II

EDİTÖRLER

DOÇ. DR. İSMAİL DEMİR

DOÇ. DR. HAKAN KIR

EĞİTİM
yayınevi

TARIM, ÇEVRE VE İKLİM EKSENİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE ARAŞTIRMALAR-II

Editörler: Doç. Dr. Hakan Kır, Doç. Dr. İsmail Demir

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Tasarım Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-611-3

1. Baskı, Aralık 2025

Kütüphane Kimlik Kartı

TARIM, ÇEVRE VE İKLİM EKSENİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE ARAŞTIRMALAR-II

Editörler: Doç. Dr. Hakan Kır, Doç. Dr. İsmail Demir

III+167 s., 160x240 mm

Kaynakça var, dizin yok.

E-ISBN: 978-625-385-611-3

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM

yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis: İstanbul: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
+90 332 351 92 85, +90 533 151 50 42
bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.
P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America
americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye
sevkiyat@egitimyayinevi.com

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye
+90 332 499 90 00
bilgi@egitimkitabevi.com

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr
bilgi@kitapmatik.com.tr

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
yayınevi



kitapmatik
eğitim yayınevi

Kitapmatik
eğitim yayınevi

EĞİTİM
kitabevi

İÇİNDEKİLER

AĞIR METAL KİRLİLİĞİNİN İZLENMESİNDE BİTKİSEL BİYOMONİTÖRLERİN ROLÜ VE ÖNEMİ.....	1
Çiğdem ER ÇALIŞKAN	
DAMLA SULAMA DAMLATICI TASARIMINDA YENİ NESİL YAKLAŞIMLAR.....	22
Sultan KIYMAZ	
HERBARYUM, HERBARYUM HAZIRLAMA TEKNİKLERİ VE MUHAFAZASI.....	32
Selahattin ÇINAR	
İÇ ORTAM HAVASINDA BULUNAN MİKROBİYAL AEROSOLLER: VİRÜSLER VE BAKTERİLER.....	52
Hatice ÖĞÜTCÜ	
SÜRDÜRÜLEBİLİR MERA YÖNETİMİ VE KARBON AYAK İZİ AZALTIMI: TÜRKİYE ÖLÇEĞİNDE EKOLOJİK VE UYGULAMALI YAKLAŞIMLAR	59
Mahir ÖZKURT, Hakan KIR	
TARIMSAL VE GIDA ATIKLARININ EKSTRAKSİYONUNDA YAPAY ZEKA TABANLI OPTİMİZASYON VE KATMA DEĞERİ YÜKSEK BİLEŞİKLERİN ELDE EDİLMESİ.....	88
Kübra ÖZTÜRK	
TOPRAK MİKROBİYOTASI VE AGROEKOSİSTEMLERDEKİ ROLÜ: SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM VE MİKROBİYAL YÖNETİM.....	115
Tülay DİZİKİSA	
TOPRAKTAKİ BÜYÜK HAZİNE: MİKROORGANİZMA KONSORSİYUMLARININ TIBBİ AROMATİK BİTKİLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YETİŞTİRİCİLİKTEKİ ROLÜ	134
Meral KUTLU, Yaşar ERTÜRK	
TÜRKİYE FLORASINDA DOĞAL YAYILIŞ GÖSTEREN BRASSICACEAE FAMİLYASINA AİT <i>MATTHIOLA LONGIPETALA</i> (VENT.) DC. TÜRÜNÜN ANATOMİK ÖZELLİKLERİ.....	161
Sibel ULCAY	

AĞIR METAL KİRLİLİĞİNİN İZLENMESİNDE BİTKİSEL BİYOMONİTÖRLERİN ROLÜ VE ÖNEMİ

Çiğdem Er Çalışkan **

GİRİŞ

Ağır metal kirliliği, günümüzde hem çevresel sürdürülebilirliği hem de halk sağlığını tehdit eden en kritik ekotoksikolojik sorunlardan biri olarak değerlendirilmektedir (Lubal, 2024). Bu metaller; volkanik faaliyetler, kayaç erozyonu gibi doğal süreçlerin yanı sıra madencilik, endüstriyel üretim, fosil yakıt kullanımı, tarımsal kimyasal girdiler ve yoğun trafik emisyonları gibi antropojenik faaliyetler sonucunda çevreye yayılmaktadır (Alloway, 2012). Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), arsenik (As), nikel (Ni) ve çinko (Zn) başta olmak üzere birçok ağır metal biyolojik olarak parçalanamayan, uzun süre çevrede kalıcı özellik gösteren ve ekosistemlerde biyobirikim (bioaccumulation) ile biyobüyütme (biomagnification) süreçlerine girerek toksik etkilerini artıran elementlerdir (Duffus, 2002; Gupta ve Kulshrestha, 2016; Tchounwou vd., 2012). Son dönem çalışmalar, özellikle endüstriyel bölgelerde toprak ve bitki dokularında Pb, Zn ve Cd birikiminin dikkat çekici düzeylere ulaştığını ortaya koymaktadır (Likus-Ciešlik vd., 2025). Benzer biçimde, ağır metallerin toprak-bitki sisteminde yüksek mobilite göstermesi nedeniyle bu elementlerin bitkisel dokulara taşınma oranlarının yüksek olduğu ve özellikle Pb ile Cd toprakta bağlanma eğilimleri düşük olduğunda bitki bünyesinde kolaylıkla biriktiği bildirilmektedir (Kabata-Pendias, 2000). Ağır metallerin çevresel ortamlarda yoğunlaşması ise yalnızca yüzey sularını değil, yeraltı suyu ve toprak mikrobiyal faaliyetlerini de olumsuz etkileyerek ekosistemin biyolojik dengesinin bozulmasına yol açmaktadır. Toprak mikroorganizmalarının çeşitliliğinin azalması, enzim aktivitelerinin baskılanması ve besin döngüsünün yavaşlaması bu süreçlerin önemli sonuçları arasındadır (Giller vd., 2009). Uzun

**Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Kırşehir / Türkiye, E-posta: cigdem.ercaliskan@ahievran.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5821-7489>

vadede çevresel bozulma; bitki örtüsünün zayıflamasına, habitat kayıplarına ve biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açmaktadır (Ranawakage vd., 2021). Bitkiler ağır metal stresine karşı yüksek duyarlılık göstermekte olup, aşırı metal birikimi çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal bozuklukları tetiklemektedir (Dawar vd., 2025). Bu bozukluklar; fotosentez hızının düşmesi, solunum ve enzim aktivitelerinin baskılanması ve oksidatif stresin şiddetlenmesi şeklinde kendini gösterir (Goncharuk ve Zagorskina, 2023; Hu vd., 2023; Singh vd., 2023).

Bu süreçlerin neticesinde bitkilerde yaprak sararması (kloroz), büyüme inhibisyonu, nekroz ve hücresel hasar gibi belirgin toksisite semptomları gözlenmektedir (Mitra vd., 2021; Shaari vd., 2022). Özellikle kadmiyumun bitki dokularında yüksek düzeyde birikmesi, tarımsal ürünlerde kalite kayıplarına yol açmakta ve bu ürünlerin tüketilmesi insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır (Mitra vd., 2021). Bu nedenle bitkiler, çevresel değerlendirmelerde yalnızca biyomonitör olarak değil, aynı zamanda kirleticilerin uzaklaştırılmasına katkı sunan biyoremediatör türler olarak da önemli bir rol oynamaktadır (Gorelova ve Frontasyeva, 2017; Raklami vd., 2022).

Ağır metallerin çevresel tehditlerinin yanı sıra, insan sağlığı üzerindeki toksik etkileri de oldukça belirgindir. Bu metaller, biyolojik dokularda birikerek uzun vadede kümülatif toksisite oluşturur ve çeşitli metabolik sistemleri olumsuz etkiler (Jomova vd., 2025). Örneğin kurşun (Pb), özellikle çocuklarda merkezi sinir sistemi gelişimini bozarak kalıcı nörolojik ve bilişsel fonksiyon kayıplarına neden olabilmektedir (Laoye vd., 2025). Kadmiyum (Cd) ise uzun süreli maruziyet durumlarında böbrek tübüler dejenerasyonu, kemik mineral yoğunluğunun azalması ve kalsiyum metabolizmasında bozulma gibi sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilmiştir (Abd Elnabi vd., 2023). Bu elementlerin önemli bir kısmı gıda zinciri yoluyla insanlara ulaşmakta; kirlenmiş topraklarda yetişen tarımsal ürünler, kök ve yaprak dokularında biriken metalleri tüketim yoluyla insan vücuduna aktarabilmektedir (Mititelu vd., 2025; Öztürk vd., 2023). Dolayısıyla ağır metal kirliliği yalnızca çevresel bir problem değil; aynı zamanda gıda güvenliği, ekosistem sağlığı, tarımsal sürdürülebilirlik ve halk

sağlığı açısından çok boyutlu bir tehdit olarak değerlendirilmektedir (Mititelu vd., 2025). Bu nedenle ağır metal kirliliğinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve etkin biçimde yönetilmesi, hem bilimsel araştırmaların hem de çevresel politika ve sürdürülebilir kalkınma stratejilerinin temel hedeflerinden biri hâline gelmiştir (Henni, 2025). Ağır metal kirliliğinin ekolojik etkilerinin doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi için yalnızca kimyasal analiz yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, kirleticilerin canlı organizmalar üzerindeki biyolojik etkilerini yansıtan izleme metotlarına gereksinim duyulmaktadır (Ciftci vd., 2024). Bu zorunluluk, çevresel kirleticilerin canlı sistemler üzerindeki etkilerini doğrudan gözlemleme imkânı sunan biyomonitörlük yaklaşımını ortaya çıkarmıştır (Baczewska-Dąbrowska vd., 2023). Biyomonitörlük, çevresel kirleticilerin yoğunluğunu, mekânsal dağılımını ve ekotoksikolojik etkilerini; canlı organizmaların biyokimyasal birikim kapasiteleri, fizyolojik tepkileri ve metabolik adaptasyon süreçleri üzerinden değerlendiren bütüncül bir çevresel izleme yaklaşımıdır (Raklami vd., 2022). Bu yöntem, çevresel stres faktörlerine karşı biyota temelli göstergeleri kullanarak ekosistem sağlığının doğrudan biyolojik düzeyde izlenmesini sağlar. Son yıllarda biyomonitörlük, ağır metal kirliliği, hava kalitesi izleme ve ekosistem sağlık değerlendirmesi gibi alanlarda, geleneksel kimyasal analizlere tamamlayıcı nitelikte, ekolojik bütünlük odaklı bir yöntem olarak önem kazanmıştır. Bu özelliğiyle biyomonitörlük, sadece mevcut kirletici konsantrasyonlarını belirleyen fizikokimyasal analizlere kıyasla daha geniş bir ekolojik perspektif sunar.

Biyomonitörlük uygulamaları iki temel yaklaşım üzerine kurulmuştur:

- *Pasif Biyomonitörlük*: Belirli bir bölgenin doğal florasına veya faunasına ait organizmaların, kirleticileri ne düzeyde biriktirdiğinin incelenmesine dayanır. Bu yöntem, yerleşik kirlilik yükünü gösterir (Gallego-Cartagena vd., 2021).
- *Aktif Biyomonitörlük*: Seçilen belirli türlerin kontrollü koşullarda farklı izleme alanlarına yerleştirilmesi ve bu canlıların kirleticilere verdiği tepkilerin belirli bir süre sonunda analiz edilmesi esasına dayanır (Chakraborty ve Paratkar, 2006).

Bu iki yöntem birlikte kullanıldığında, hem anlık kirlilik seviyeleri hem de zaman içindeki değişim eğilimleri daha güvenilir ve kapsamlı bir biçimde değerlendirilebilir (Mohammed vd., 2025).

Bitkiler, biyomonitörlük çalışmalarında en yaygın kullanılan canlı gruplarının başında gelmektedir. Bunun temel nedenleri, bitkilerin çevresel strese yüksek duyarlılık göstermeleri, bulundukları ortamdaki kirleticilere uzun süre maruz kalmaları ve bu kirleticileri yaprak, kök ve gövde dokularında biriktirme kapasiteleridir (Mamine vd., 2024). Ayrıca bitkiler, atmosferik partikülleri ve metal iyonlarını hem yüzeylerinde hem de dokularında biriktirerek çevresel kirliliğe dair doğal bir kayıt mekanizması oluşturmaktadır (He vd., 2024). Bitkisel biyomonitörlük yalnızca kirliliğin tespiti açısından değil, aynı zamanda erken uyarı sistemi olarak da değerlidir. Bitkilerde meydana gelen klorofil bozulması, oksidatif stres artışı, yaprak lekeleri, büyüme bozuklukları ve enzim aktivitesi değişiklikleri; çevredeki kirleticilerin varlığını ve toksisite düzeyini gösteren erken biyolojik göstergelerdir (Maleki vd., 2017). Bunun yanında bazı bitki türleri fitoremediasyon potansiyelleri sayesinde toksik maddelerin çevreden uzaklaştırılmasına katkı sağlayarak çevre yönetiminde çifte işlev görmektedir (Priya vd., 2023).

Literatürde, çeşitli bitki türlerinin Pb, Cd, Zn, Cu, Ni ve Fe gibi ağır metalleri dokularında biriktirme kapasitesine sahip olduğu ve bu özellikleriyle güvenilir biyolojik göstergeler olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Örneğin, *Elaeagnus angustifolia* L.'nin kentsel kirliliğe bağlı olarak Ni, Fe, Mn, Cu ve Zn biriktirdiği (Zengin ve Yıldız, 2019) ve *Populus nigra* ile *Cedrus libani*'nin Pb, Zn ve Cd birikimi için etkin biyomonitör türler olduğu rapor edilmiştir (Cıftıcı vd., 2021). İğne yapraklı türlerde (*Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*) ise, trafik ve endüstriyel emisyonlara yakın alanlarda Pb, Cd ve Cu konsantrasyonlarının belirgin biçimde yükseldiği saptanmıştır (Aricak vd., 2020). Bu çalışmalar, bitkisel dokularda metal birikiminin çevresel kirlilik düzeyleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ve bitki türlerinin fizyolojik özelliklerine bağlı olarak seçici duyarlılık sergilediğini ortaya koymaktadır. Bitkiler aracılığıyla yapılan element birikimi analizleri, yaygın olarak toprak analizleriyle ilişkilendirilse de, bu ilişkinin karmaşık bir dizi toprak özelliğinden etkilendiği

unutulmamalıdır. Toplam organik madde (TOM), kalsiyum karbonat CaCO_3 ve topraktaki besin elementleri gibi faktörler, ağır metallerin bitki tarafından fito-yararlanımını doğrudan belirler (Yotova vd., 2018). Özellikle toprak asitliği (pH), kirleticilerin toksisitesini artırabilir veya tetikleyebilir (Dhyèvre vd., 2014) bu durum, bitkilerin elementleri alma ve biyobirikim (bioaccumulation) kapasitesini önemli ölçüde etkiler (Syta vd., 2016). Topraktaki ağır metal ve eser element konsantrasyonları belirli bir eşiğin üzerine çıktığında, çoğu bitki türünün biyobirikim kapasitesi yetersiz kalmakta ve toksik etkilere karşı fizyolojik dayanıklılığı azalabilmektedir. Bu durumda, çevresel kirlilikle mücadelede özel adaptasyon mekanizmalarına sahip hiperakümülatör bitkiler devreye girer.

Bu bitkiler, yalnızca biyomonitörlük açısından değil, aynı zamanda fitoremediasyon süreçlerinde yani kirlenmiş toprak ve suların biyolojik yollarla temizlenmesinde etkin rol oynayan doğal biyoteknolojik araçlar olarak değerlendirilmektedir (Raklami vd., 2022). Son dönem çalışmalar, hiperakümülatör türlerin bu yüksek metal toleransını; şelat oluşturma, antioksidan savunma sistemlerinin güçlenmesi ve metal taşıyıcı proteinlerin (metalotioneinler, fitokelatinler) aşırı ekspresyonu gibi fizyolojik ve moleküler mekanizmalarla sürdürdüğünü göstermektedir (Abd Elnabi vd., 2023).

Ağır metal kirliliğinin ekosistem işleyişi, tarımsal üretim süreçleri ve halk sağlığı üzerindeki çok boyutlu etkileri, bitkisel biyomonitörlüğü çevresel kirlenmenin değerlendirilmesinde temel bir yaklaşım hâline getirmiştir. Bitkilerin ağır metalleri absorbe etme, doku yapılarında biriktirme ve fizyolojik süreçlerinde ortaya çıkan değişimlerle kirleticilere duyarlı tepki verme özellikleri, kirleticilerin çevredeki dağılımının güvenilir bir şekilde izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu kitap bölümü, ağır metal kirliliğinin ekosistem bileşenleri üzerindeki çok boyutlu etkilerini ve bitkilerin biyomonitör olarak kullanımına ilişkin temel bilimsel çerçeveyi bütüncül bir yaklaşımla ele almaktadır. Bu kapsamda; (i) ağır metallerin çevresel ortamlardaki davranışı ve ekotoksikolojik etkileri, (ii) bitkilerde metal alımı ve birikimini belirleyen biyotik ve abiyotik faktörler, (iii) biyomonitörlükte kullanılan bitki gruplarının yapısal ve fizyolojik özellikleri ile avantaj-kısıtları ve (iv) biyomonitör bitkilerde ağır metal

tafininde başvuru alan analitik yaklaşımlar ayrıntılı biçimde incelenecektir. Böylece hem akademik araştırmalar hem de çevresel izleme, kentsel planlama ve ekolojik risk değerlendirme uygulamaları için, bitkisel biyomonitörlüğe dayalı modern bir değerlendirme çerçevesi sunulması hedeflenmektedir.

Ağır Metal Kirliliğinin Çevresel Dağılımı ve Ekotoksikolojik Etkileri

Ağır metaller, başta madencilik, metalürji, fosil yakıtların yanması, endüstriyel atıkların kontrolsüz deşarjı, kanalizasyon çamurları, fosfatlı gübreler ve pestisit uygulamaları olmak üzere çok sayıda antropojenik kaynak aracılığıyla çevreye yayılmakta ve hava (Li vd., 2019), toprak (Peng vd., 2022) ve su ekosistemlerindeki (Niu vd., 2019) kirlilik yükünü önemli ölçüde artırmaktadır. Küresel ölçekte hızla artan nüfus, kentleşme ve endüstriyel yoğunluk, özellikle kentsel çevreler üzerindeki baskıyı artırarak ağır metal kirliliğinin yayılımını hızlandırmaktadır (Fasani vd., 2016). Ağır metallerin doğada kolayca parçalanamaması, uzun süreli çevresel kalıcılık göstermesi ve düşük konsantrasyonlarda dahi yüksek derecede toksik veya kanserojen etki oluşturabilmesi (Chaparro vd., 2020), bu elementleri hem ekosistemler hem de insan sağlığı açısından kritik bir çevresel sorun hâline getirmektedir.

Hücre düzeyinde ağır metaller; nükleus, mitokondri, endoplazmik retikulum ve plazma membranı gibi temel yapısal bileşenleri hedef alarak metabolik süreçlerin bütünlüğünü bozmakta, detoksifikasyon mekanizmalarının etkinliğini sınırlamakta ve DNA hasar yanıtı ile onarım sistemlerinin işleyişini olumsuz etkilemektedir (Şekil 1). Kurşun, kadmiyum, cıva, krom, nikel, arsenik ve bakır gibi yaygın toksik elementler, ekotoksikolojik etkileri çok sayıda bilimsel çalışmada ortaya konulan başlıca ağır metal gruplarını oluşturmaktadır (Edo vd., 2024).

Kadmiyum (Cd), madencilik, metal işleme ve fosfatlı gübre kullanımı gibi antropojenik faaliyetler sonucu toprak ve su sistemlerinde birikmekte; bitkilerde fotosentez, kök gelişimi ve enzimatik reaksiyonlar üzerinde baskılayıcı etkiler göstermektedir (Peana vd., 2022). Cıva (Hg), çevrede elementel, inorganik ve organik

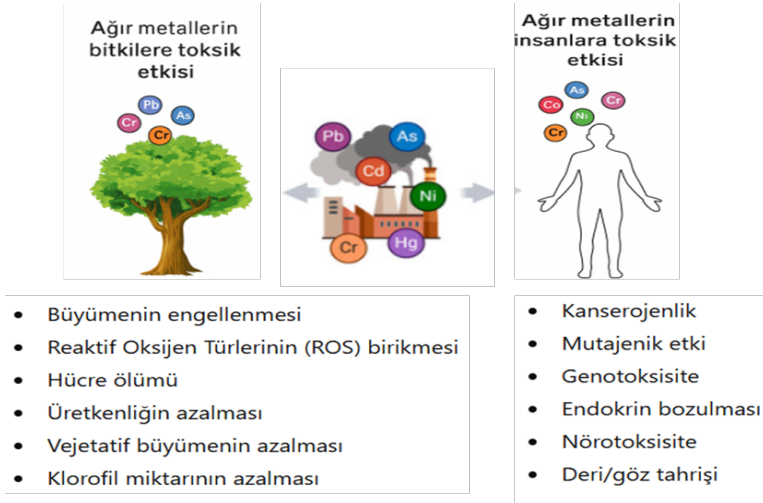
formlarda bulunmakta olup, sucul ortamlarda metilcıvaya (MeHg) dönüşerek biyoyararlanım ve toksisitesini artırmakta; MeHg'nin besin zinciri boyunca biyobüyütme göstermesi insanlarda ciddi nörotoksik etkilere yol açmaktadır (Randall ve Chattopadhyay, 2013). Kalıcı ve biyolojik olarak parçalanamayan kurşun (Pb), özellikle kentsel ve endüstriyel bölgelerde toz ve partikül kaynaklı maruziyet yoluyla çevresel risk oluşturmaktadır (Armaroli ve Balzani, 2011). Krom (Cr) bileşikler arasında özellikle Cr(VI) formu güçlü oksidan özellikleri nedeniyle yüksek kanserojen potansiyele sahiptir ve ferro-krom üretim tesisleri Cr(VI) birikiminin başlıca kaynaklarını oluşturur (Dubey vd., 2023: 140). Nikel (Ni) solunum yolu maruziyetlerinde alerjik reaksiyonlardan solunum sistemi tümörlerine kadar geniş bir toksik etki spektrumu oluşturabilirken (Adhikari vd., 2022), esansiyel bir mikroelement olan çinko (Zn), fizyolojik sınırların üzerinde çevrede biriktiğinde ekosistem dengesi üzerinde bozucu etkilere neden olabilmektedir (Natasha vd., 2022). Antimon (Sb) ise eser düzeylerde dahi yüksek toksisite gösteren bir element olup, özellikle endüstriyel ortamlarda inhalasyon yoluyla alındığında pankreatit, kardiyotoksisite ve kronik pulmoner hastalıklara yol açabilir ve karsinojenik etkileri literatürde bildirilmektedir (Sundar ve Chakravarty, 2010).

Ağır metal birikimi ekosistemleri toprak, su ve bitki düzeyinde çok boyutlu olarak etkileyen kapsamlı bir ekotoksikolojik süreçtir. Toprak ekosistemlerinde yüksek metal konsantrasyonları; mikrobiyal biyokütlede azalmasına, azot mineralizasyonu ve organik madde ayrışması gibi temel biyokimyasal süreçlerin yavaşlamasına ve enzim aktivitelerinin baskılanmasına yol açmakta; bu durum besin elementlerinin döngüsünü zayıflatarak toprak verimliliğini ve ekosistem hizmetlerini sınırlamaktadır (Giller vd., 2009). Sucul ekosistemlerde ise Cd, Pb, Hg ve As gibi toksik elementler sediment, su, biyota arasında dinamik bir dağılım sergilemekte ve besin zincirinde biyobüyütme göstererek hem ekosistem sağlığı hem de insan tüketimi açısından risk oluşturmaktadır (Singh vd., 2023). Bitkilerde ağır metal alımı kök düzeyinde başlamaktadır; ksilem–floem taşınımı ile dokulara taşınan metaller fotosentez hızında azalma, klorofil bozunması, su dengesinin bozulması ve oksidatif stres artışı gibi birçok fizyolojik bozukluğa yol açmaktadır (Mohamed vd., 2025). Cd ve Pb gibi

metallerin aşırı birikimi büyüme geriliği, kloroz, nekroz ve biyokütle üretiminde azalma ile kendini göstermektedir (Collin vd., 2022).

Bu ekotoksikolojik süreçler yalnızca bireysel bitki düzeyinde değil, aynı zamanda bitki örtüsünün kompozisyonu ve tür çeşitliliği üzerinde de belirleyici olmaktadır. Metal yükü yüksek alanlarda toleransı düşük türlerin baskılanması ve metal-tolerant ya da hiperakümülatör türlerin ekolojik üstünlük kazanması, habitat yapısında ve ekosistem fonksiyonlarında uzun vadeli değişimlere yol açmaktadır (Wan vd., 2024). Ağır metal birikimi aynı zamanda tarımsal üretim miktarını ve ürün kalitesini olumsuz etkileyerek sürdürülebilir tarım sistemleri üzerinde de ciddi baskılar oluşturmaktadır (Rashid vd., 2023).

Sonuç olarak ağır metaller; toprak, su ve canlı bileşenler arasında sürekli dolaşıma giren, uzun süreli birikim ve biyobüyütme eğilimi gösteren ve bu özellikleri nedeniyle ekosistem sağlığını çok boyutlu olarak olumsuz etkileyen kalıcı kirleticilerdir.



Şekil 1. Ağır Metallerin Bitkiler ve İnsanlar Üzerindeki Temel Toksik Etkileri (Tarish vd., 2024)

Bitkilerde ağır metal birikimine etki eden faktörler

Bitkilerde ağır metal birikimi, çevresel koşullar, bitki türünün biyolojik özellikleri ve metalin kimyasal davranışı arasındaki karmaşık

etkileşimlerin bir sonucudur. Ağır metaller, hem kök sistemleri aracılığıyla topraktan hem de atmosferik çökeltme, partikül birikimi ve gaz fazı emisyonları yoluyla yaprak yüzeylerinden bitkilere geçebilmektedir (Wu vd., 2025). Bu süreçleri belirleyen faktörler; trafik yoğunluğu, endüstriyel emisyonlar, toprak-hava etkileşimleri, bitki türüne özgü morfolojik ve fizyolojik özellikler, yaprak yüzeyi karakteristikleri ile mevsimsel ve çevresel stres koşullarını kapsamaktadır (Rashid vd., 2023). Aşağıda bu faktörlerin ağır metal birikimine katkıları alt başlıklar hâlinde ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Trafik Yoğunluğu

Trafik kaynaklı emisyonlar, özellikle Pb, Zn, Cu, Ni ve Cd gibi ağır metallerin yaprak yüzeylerinde birikimine yol açan başlıca antropojenik kaynaklar arasında yer almaktadır. Birçok çalışma, yol kenarında yetişen bitki türlerinde ağır metal yükünün trafik yoğunluğu ile doğrusal biçimde arttığını göstermektedir (Rodríguez-Santamaría vd., 2022). Örneğin Bingöl’de yürütülen bir araştırmada, trafik yoğunluğundaki artışa paralel olarak Pb, Cd ve Ni birikiminin hem bitki dokularında hem de toprakta anlamlı şekilde yükseldiği bildirilmiştir (Vural, 2021). Benzer biçimde *Pinus sylvestris* ve *Tilia* türlerinde yol kenarına yakın bölgelerde Zn ve Pb birikiminin belirgin düzeyde arttığı rapor edilmiştir (Arıcak vd., 2020).

Endüstriyel Emisyonlar

Metal ergitme tesisleri, çimento fabrikaları, kömürlü termik santraller ve metal işleme endüstrileri, atmosferik ağır metal salınımının başlıca kaynaklarını oluşturmaktadır. Bu tesislerin çevresinde yetişen liken ve yosun türlerinde Pb, Cd, As, Zn ve Cr birikimlerinin, kırsal ve arka plan alanlarına kıyasla birkaç kat daha yüksek olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Bir çimento fabrikası çevresinde toplanan *Pseudevernia furfuracea* örneklerinde Fe, Mn, Pb ve Zn konsantrasyonlarının kontrol alanına göre 3–7 kat daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Gallo vd., 2014).

Toprak-Hava Etkileşimleri

Ağır metaller bitkilere hem kök alımı hem de atmosferik çökeltme yoluyla geçebilmektedir. Toprak pH’ı, organik madde içeriği ve kation

değişim kapasitesi, bitkilerin metali kök yoluyla alma kapasitesini doğrudan belirleyen temel faktörlerdir (Kabata-Pendias, 2000). Öte yandan atmosferik partiküller yaprak yüzeyine tutunarak doğrudan birikime neden olabilmektedir. Özellikle Cd ve Zn gibi mobilitesi yüksek metallerin hem atmosferik çökeltme yoluyla yaprak yüzeyine geçişi hem de toprak yoluyla kök alımı oldukça yüksektir (Jiang vd., 2024). Dolayısıyla bitkilerde saptanan metal yükü çoğu zaman kök alımı ile atmosferik birikimin birleşik etkisinin bir sonucudur.

Tür Özellikleri

Bitkilerin ağır metal birikim kapasitesi türler arasında önemli farklılıklar göstermekte olup bu farklılıklar morfolojik, anatomik ve fizyolojik özelliklerle ilişkilidir. Likenler ve yosunlar atmosferik metallerle karşı yüksek duyarlılık gösterirken, *Pinus*, *Cedrus* ve *Populus* gibi odunsu türler hem kök hem de yaprak birikimi açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı türler hiperakümülatör özellik sergileyerek çok yüksek düzeyde metal biriktirebilmektedir (Reeves vd., 2018). Metal birikimini belirleyen diğer tür içi faktörler arasında antioksidan savunma sisteminin kapasitesi ile fitokelatinler gibi metal bağlayıcı proteinlerin düzeyi yer almaktadır (van Der Ent ve Rylott, 2024).

Yaprak Yüzeyi, Kütikula Kalınlığı ve Stoma Yoğunluğu

Yaprak yüzeyi özellikleri, özellikle atmosferik metal birikiminin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Kütikula kalınlığı, trikom yoğunluğu ve stomaların yerleşimi gibi morfolojik özellikler, yaprak yüzeyinde partikül ve metal tutulumunu doğrudan etkilemektedir. Örneğin yaprak kütikula kalınlığının arttığı türlerde atmosferik partiküllerin ve ağır metallerin birikiminin de yükseldiği gösterilmiştir (Prigioniero vd., 2023). İğne yapraklı türlerde (örneğin *Pinus* ve *Picea*), yüksek yüzey alanı ve mumsu tabaka, atmosferik partikül tutunumu ve metal birikimini artıran önemli yapısal özelliklerdir (Ejaz vd., 2023).

Mevsimsel Değişim ve Çevresel Stres Faktörleri

Mevsimsel değişimler ve çevresel stres koşulları, bitkilerde ağır metal birikimini önemli ölçüde etkileyen diğer faktörlerdir. Sıcaklık, yağış ve rüzgâr hızı gibi iklimsel değişkenler, atmosferik partikül

çökmesini ve metal taşınımını doğrudan belirlemektedir. Yapılan çalışmalar, kış ve sonbahar aylarında artan yağış ve atmosferik çökmenin özellikle Pb, Zn ve Cd birikimini yükselttiğini ortaya koymuştur (Szczepaniak ve Biziuk, 2003). Bitkiler kuraklık veya su stresi altında kaldığında, kök geçirgenliği, iyon taşınımı ve metal taşıyıcı sistemler değişebildiğinden Cd ve Pb gibi metallere ilişkin kök alımı artabilmektedir (Angulo-Bejarano vd., 2021).

Ağır metal kirliliğinin izlenmesinde biyomonitör bitki grupları

Bitkiler, ağır metallerin çevredeki dağılımının izlenmesinde düşük maliyetli, yüksek duyarlılığa sahip ve geniş ekolojik temsiliyeti olan biyolojik araçlar olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Toprak, su ve atmosfer ile doğrudan temas hâlinde olmaları sayesinde hem toprak kaynaklı hem de atmosferik metal yükünü yansıtan doğal biyomonitörlerdir. Bitkilerde metal birikimi kök, gövde ve yaprak dokularında gerçekleşebilmekte; bu nedenle bitkisel biyomonitörlük ağır metal kirliliğinin hem mekânsal hem de zamansal ölçekte değerlendirilmesi için etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Dizdari vd., 2012).

Biyomonitör bitki grupları; atmosferik çökme, topraktan kök alımı ve yüzey tutunması yoluyla ağır metal birikimini yansıtan farklı taksonomik ve ekolojik özelliklere sahip türlerden oluşmaktadır. Likenler, yosunlar, otsu bitkiler ile yapraklı ve iğne yapraklı ağaç türleri, farklı birikim mekanizmaları ve duyarlılık düzeyleri nedeniyle ağır metal kirliliğinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan temel biyomonitör gruplarıdır.

Likenler ve yosunlar, kutikula tabakasından yoksun olmaları, su ve besin maddelerini doğrudan atmosferden almaları ve yüzey alanlarının geniş olması nedeniyle özellikle atmosferik ağır metal birikimini son derece iyi yansıtır (Petrova, 2011). Bu nedenle endüstriyel bölgeler, trafik yoğun çevreler ve kentsel atmosferdeki metal yükünün değerlendirilmesinde sıkça tercih edilmektedirler (Wolterbeek, 2002). Otsu bitkiler ve yol kenarı yabancı türler ise hem kök hem de yaprak yoluyla metal alımı gerçekleştirdikleri için toprak-atmosfer etkileşimini değerlendirmede önemli birer biyomonitör olarak kullanılmaktadır. *Taraxacum officinale*, *Plantago major*, *Carduus*

nutans ve *Urtica dioica* gibi yaygın otsu türlerin Zn, Pb, Cd ve Cu gibi metalleri yüksek duyarlılıkla biriktirdiği birçok çalışmada gösterilmiştir (Gombert vd., 2006; Petrova, 2011).

Epifitik türler de atmosferik ağır metal izleme çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Özellikle *Tillandsia purpurea* ve *Tillandsia latifolia* türlerinin kirlenmemiş alanlardan alınıp kirli alanlara transplant edildiği çalışmalarda; Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb ve Zn gibi çok sayıda elementin atmosferik birikiminin güvenilir biçimde ortaya konduğu bildirilmiştir. Bu türlerle elde edilen EB (exposed-to-baseline) oranlarının yüksek olması, ağır metallerin sanayi ve trafik kaynaklı yayılımını açık biçimde göstermektedir (De La Cruz vd., 2021).

Ağaç türleri de ağır metal kirliliğinin izlenmesinde yaygın biçimde kullanılan önemli biyomonitör gruplarıdır. *Morus alba*, *Eucalyptus camaldulensis* ve *Azadirachta indica* gibi ağaç türlerinde yaprak ve kabuk dokularında Pb, Zn, Cd ve Cu birikimi rapor edilmiş; özellikle kentsel ve endüstriyel alanlarda çevresel metal yükünü yansıtmaya kapasitelerinin yüksek olduğu gösterilmiştir (Senanayake vd., 2023). Ağaç türlerinin kalıcı dokulara sahip olmaları, uzun dönemli birikim eğilimlerinin izlenmesine ve mevsimsel değişimlerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Genel olarak liken, yosun, otsu bitki ve ağaç türlerinin birlikte değerlendirilmesi, çevresel ağır metal kirliliğinin kapsamlı ve çok boyutlu bir şekilde analiz edilmesine imkân tanımaktadır. Çevresel ağır metal izleme çalışmalarında kullanılan temel bitki grupları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Bitkisel Biyomonitörlükte Kullanılan Bitki Grupları ve Uygulama Alanları

Bitki Grubu	Örnek Türler	İzlenen Ağır Metaller	Kullanım Alanı	Kaynaklar
Likenler	<i>Pseudevernia furfuracea</i>	Cu, Cd, Ni, Pb, Mn, Zn	Kentsel kirlilik haritalama	(Işık ve Yıldız, 2025)
Yosunlar	<i>Cladophora glomerata</i>	Zn, Cu, Pb, Fe	Su kirliliği izleme	(Gündoğan vd., 2005)
Ağaç Türleri	<i>Populus nigra, Cedrus libani, Pinus sylvestris</i>	Pb, Cd, Zn, Cu, Ni	Trafik ve endüstriyel kirlilik izleme	(Cıftıcı vd., 2021)
Çalı türleri	<i>Acacia nilotica, Calotropis procera, Ricinus communis, Ziziphus mauritiana, Athyrium esculentum, Chromolaena odorata, Lantana camara</i>	Pb, Zn, Ni, Mn, Fe	Trafik kaynaklı ağır metal kirliliği	(Altat vd., 2021)
Otsu bitkiler	<i>Taraxacum officinale,</i>	Cd, Cu, Fe, Pb	Yol kenarı ağır metal birikimi	(Sulaiman ve Hamzah, 2018)
		Zn, Cu, Pb, Cd	Toprak-hava etkileşimi, trafik kirliliği	(Królak, 2003)

Biyomonitör bitkilerde ağır metal tayini için kullanılan analitik yaklaşımlar

Biyomonitör bitkiler kullanılarak gerçekleştirilen ağır metal analizlerinde en yaygın kullanılan teknikler indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometrisi (ICP-MS) (Fang vd., 2021) ve indüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometrisi (ICP-OES) (Kılıç, 2019) olup, bunlara ek olarak atomik absorpsiyon spektroskopisi (FAAS) (Cıftıcı vd., 2021; Er Caliskan vd., 2023) ve atomik floresans spektroskopisi (AFS) (Fang vd., 2021) de sıklıkla tercih edilmektedir. ICP-MS özellikle düşük konsantrasyonlu elementlerin belirlenmesinde yüksek hassasiyet sağlarken, ICP-OES daha geniş konsantrasyon aralıklarında güvenilir ölçümler sunmaktadır. AAS ve AFS ise belirli elementlerin hızlı, seçici ve maliyet açısından verimli analizine olanak sağlar. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, biyomonitör bitkiler aracılığıyla çevresel ağır metal yükünün doğru, tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tekniklere ek olarak, bazı çalışmalarda metal birikiminin doku düzeyindeki dağılımını incelemek için taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM-EDX) kullanılmaktadır.

Bu tekniklerin uygulanabilmesi için örneklerde ön hazırlık olarak yaş yakma (Kılıç, 2019), mikrodalga destekli asit çözme (Cakaj vd., 2023) veya kül fırınında yakma sonrası asitle çözme (Cıftıcı vd., 2021) işlemleri kullanılmaktadır. Tablo 2’de farklı biyomonitör bitkilerde kullanılan çözme yöntemleri ve analitik teknikler bir arada sunulmuştur.

Tablo 2. Bitkisel Biyomonitörlükte Kullanılan Analitik Teknikler

Bitki Türü	Kullanılan Çözme Yöntemi	Analitik Teknik	Analiz Edilen Metaller	Kaynak
<i>Funaria hygrometrica</i>	Yaş yakma	GFAAS, ICP-AES, SEM, TEM	Pb, Zn	(Basile vd., 2017)
<i>Polytrichum commune</i>	Yaş yakma	AAS, SEM	Cr, Cu, Zn	(Panda, 2003)
<i>Hypnum plumaeforme</i> , <i>Taxithelium instratum</i>	Yaş yakma	EDXRF	Cu, Zn, Cr, Hg, Pb, Th, U, V, Mn, Fe)	(Abdullah vd., 2012)
<i>Syrrhopodon confertus</i>	Yaş yakma	FAAS	Fe, Zn, Mn, Ni	(Abdullah vd., 2014)
<i>Physcomitrella patens</i> , <i>Mielichhoferia elongata</i> , <i>Pohlia drummondii</i>	Yaş yakma	SEM-EDX	Cu	(Antreich vd., 2016)
<i>Pleurochaete squarrosa</i> , <i>Timmiella barbuloidea</i>	Yaş yakma	AAS	Pb, Ni, Cu, Cr	(Aydoğan vd., 2017)
<i>Pseudevernia furfuracea</i> (liken)	Kül fırını	ICP-MS	Cu, Cd, Ni, Pb, Mn, Zn	(Işık ve Yıldız, 2025)
<i>Ficus benghalensis</i> , <i>Swietenia macrophylla</i> , <i>Polyalthia longifolia</i>	Yaş yakma	ICP-OES	Cd, Ni, Pb, Cr	(Anwar vd., 2025)
<i>Trifolium pratense</i> , <i>Rumex acetosa</i> , <i>Amaranthus retroflexus</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Alcea rosea</i> , <i>Lolium multiflorum</i>	Mikrodalga çözme	ICP-MS	Cd, Pb, Cu, Zn	(Cakaj vd., 2023)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Ağır metal kirliliği, ekosistem işleyişini ve insan sağlığını olumsuz etkileyen başlıca çevresel sorunlardan biridir. Sanayi, madencilik, trafik ve tarımsal uygulamalar gibi antropojenik faaliyetler sonucu çevreye yayılan ağır metaller; toprak, su ve atmosferde kalıcı özellik göstererek biyobirikim ve biyobüyütme yoluyla toksisite oluşturabilmektedir. Bitkiler, kök yoluyla topraktan metal alımı ve yaprak yüzeylerinde atmosferik çökelişi yansıtmaya özellikleri sayesinde ağır metal kirliliğinin izlenmesinde etkili biyolojik göstergeler olarak kullanılmaktadır. Likenler, yosunlar, otsu ve odunsu bitkiler farklı ekolojik ve fizyolojik özellikleriyle hem kısa hem de uzun dönemli maruziyeti yansıtabilmekte; böylece kirliliğin kaynağının, mekânsal dağılımının ve düzeyinin belirlenmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu kitap bölümünde ağır metallerin çevresel davranışları, bitkilerde birikim mekanizmaları, ekotoksikolojik etkileri ve bitkisel biyomonitörlük yaklaşımının bilimsel temelleri değerlendirilmiş olup, biyomonitör türlerin çevresel izleme çalışmalarındaki stratejik önemi vurgulanmıştır.

Ağır metal kirliliğinin etkin bir şekilde izlenebilmesi için bitkisel biyomonitörlük uygulamalarının bilimsel standartlar doğrultusunda geliştirilmesi gerekmektedir. Farklı bitki gruplarının birlikte değerlendirildiği çok katmanlı izleme yaklaşımlarının kullanılması, atmosferik çökeliş ile toprak kaynaklı metal yükünün eş zamanlı olarak belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Örnekleme süreçlerinin; yaprak yaşı, toplanma yüksekliği, yön, yıkanmış-yıkanmamış örnek durumu ve mevsimsellik gibi değişkenleri dikkate alan standart protokoller çerçevesinde yürütülmesi, elde edilen verilerin karşılaştırılabilirliğini ve bilimsel doğruluğunu artıracaktır. Ayrıca zamansal değişimlerin değerlendirilebilmesi için mevsimsel ve yıllık periyotları kapsayan uzun dönemli izleme programlarının oluşturulması önem taşımaktadır.

Biyomonitörlük verilerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile bütünleştirilmesi, kirlilik dağılımının mekânsal olarak modellenmesini, risk bölgelerinin belirlenmesini ve çevresel karar destek sistemlerinin daha sağlam bir temele oturtulmasını sağlayacaktır. Tarımsal üretim

alanlarında düzenli biyomonitörlük çalışmaları yapılması, bitkisel ürünlerde ağır metal birikiminin erken saptanmasına katkı sağlayarak gıda güvenliği açısından önemli bir koruyucu adım oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra hiperakümülatör bitkilerin fitoremediasyon amaçlı kullanımı, metal yükünün bitki dokularında tutulması ve ortamdan uzaklaştırılması yoluyla ekolojik açıdan sürdürülebilir bir azaltım stratejisi sunmaktadır.

Organize sanayi bölgeleri, madencilik sahaları ve yoğun trafik koridorlarında biyomonitörlük uygulamalarının yerel yönetimler tarafından periyodik izleme programlarına entegre edilmesi, çevresel risklerin yönetimi bakımından kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak bitkisel biyomonitörler; düşük maliyetli, uygulanabilirliği yüksek ve çevresel değişkenlere duyarlı olmaları nedeniyle ağır metal kirliliğinin izlenmesinde güçlü araçlardır. Bu sistemlerin analitik yöntemlerle desteklenerek çevresel yönetim politikalarına entegre edilmesi, sürdürülebilir çevre yönetimi ve ekosistem sağlığının korunması açısından temel bir gerekliliktir.

KAYNAKÇA

- Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalfa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Alhorieny, N. A., ve Abd Elaty, A. E. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: a review. *Toxics*, 11(7), 580.
- Abdullah, M. Z., Ismail, A., ve Mahammad, N. I. (2014). Statistical analysis of heavy metal concentration in moss and soil as indicator of industrial pollution. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 3(3), 762-775.
- Abdullah, M. Z. B., Saat, A. B., ve Hamzah, Z. B. (2012). Assessment of the impact of petroleum and petrochemical industries to the surrounding areas in Malaysia using mosses as bioindicator supported by multivariate analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(6), 3959-3969.
- Adhikari, S., Yanuar, E., ve Ng, D.-Q. (2022). Widespread nickel contamination in drinking water supplies of elementary schools in Taichung, Taiwan. *Environmental science and pollution research*, 29(9), 12531-12539.
- Alloway, B. J. (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Altaf, R., Altaf, S., Hussain, M., Shah, R. U., Ullah, R., Ullah, M. I., Rauf, A., Ansari, M. J., Alharbi, S. A., ve Alfarraj, S. (2021). Heavy metal accumulation by roadside vegetation and implications for pollution control. *Plos one*, 16(5), e0249147.
- Angulo-Bejarano, P. I., Puente-Rivera, J., ve Cruz-Ortega, R. (2021). Metal and metalloid toxicity in plants: An overview on molecular aspects. *Plants*, 10(4), 635.
- Antreich, S., Sassmann, S., ve Lang, I. (2016). Limited accumulation of copper in heavy metal adapted mosses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 101, 141-148.
- Anwar, A., Mezbah Uddin, A., Hasan, M. S., Parvez, M. S., Sipos, B., Bibi, D., Sajtos, Z., Tótmérész, B., Magura, T., ve Simon, E. (2025). Assessment of anthropogenic activities impact based on metals in soil and tree leaves along roadside in Bangladesh. *Scientific reports*, 15(1), 6960.
- Aricak, B., Cetin, M., Erdem, R., Sevik, H., ve Cometen, H. (2020). The usability of Scotch pine (*Pinus sylvestris*) as a biomonitor for traffic-originated heavy metal concentrations in Turkey. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(2), 1051-1057.
- Armaroli, N., ve Balzani, V. (2011). The legacy of fossil fuels. *Chemistry—An Asian Journal*, 6(3), 768-784.
- Aydoğan, S., Erdağ, B., ve AKTAŞ, L. (2017). Bioaccumulation and oxidative stress impact of Pb, Ni, Cu, and Cr heavy metals in two bryophyte species, *Pleurochaete squarrosa* and *Timmiella barbuloidea*. *Turkish Journal of Botany*, 41(5), 464-475.
- Baczewska-Dąbrowska, A. H., Gworek, B., ve Dmuchowski, W. (2023). The use of mosses in biomonitoring of air pollution in the terrestrial environment: a review. *Environ. Prot. Nat. Resour*, 34(2), 19-30.
- Basile, A., Loppi, S., Piscopo, M., Paoli, L., Vannini, A., Monaci, F., Sorbo, S., Lentini, M., ve Esposito, S. (2017). The biological response chain to pollution: A case study from the "Italian Triangle of Death" assessed with the liverwort *Lunularia cruciata*. *Environmental science and pollution research*, 24(34), 26185-26193.
- Cakaj, A., Lisiak-Zielińska, M., Hanć, A., Małecka, A., Borowiak, K., ve Drapikowska, M. (2023). Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Scientific reports*, 13(1), 6926.
- Chakraborty, S., ve Paratkar, G. T. (2006). Biomonitoring of trace element air pollution using mosses. *Aerosol and air quality research*, 6(3), 247-258.
- Chaparro, M. A., Chaparro, M. A., Castaneda-Miranda, A. G., Marié, D. C., Gargiulo, J. D., Lavernia, J. M., Natal, M., ve Böhnelt, H. N. (2020). Fine air pollution particles trapped by street tree barks: In situ magnetic biomonitoring. *Environmental pollution*, 266, 115229.

- Ciftci, H., Caliskan, C. E., Aslanhan, E., ve Aktoklu, E. (2021). Monitoring of heavy metal pollution by using *populus nigra* and *cedrus libani*. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(4), 367-373.
- Ciftci, H., Er Caliskan, C., Yazici, B., Tekcan, A., ve Ozturk, K. (2024). Investigation of the Effect of Silver Nanoparticles Obtained from *Primula Vulgaris* Extracts by Applying the Green Synthesis Method on MCF-7 Cells. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.(IJCCE) Research Article Vol*, 43(7).
- Collin, S., Baskar, A., Geevarghese, D. M., Ali, M. N. V. S., Bahubali, P., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., ve Koppala, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3, 100064.
- Dawar, K., Khan, A. U., Al-Mutairi, M., Alotaibi, M. O., Mian, I. A., Muhammad, A., Alam, S. S., Shoaib, S., ve Ghoneim, A. M. (2025). Utilizing spent mushroom substrate biochar to improve *Zea mays* L. growth and biochemical resilience against cadmium and chromium toxicity. *Scientific reports*, 15(1), 17511.
- De La Cruz, A. R. H., Molina, H. Y., Monrroy, X. R. V., Beringui, K., Caysahuana, A. C., Suazo, J. A., Rafael, N. C., Gioda, A., ve Payano, I. G. U. (2021). Biomonitoring of potentially toxic elements in two polluted areas from Lurigancho-Chosica Using the genus *Tillandsia latifolia* and *T. purpurea* as biomonitors. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(1), 69-76.
- Dhyèvre, A., Foltête, A. S., Aran, D., Muller, S., ve Cotelle, S. (2014). Effects of soil pH on the *Vicia-micronucleus* genotoxicity assay. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 774, 17-21.
- Dizdari, A. M., Kopliku, D., ve Golemi, S. (2012). The use of Higher Plants as Bio-Indicators of Environmental Pollution—A New Approach for Toxicity Screening in Albania. *Mediterranean Center of Social and Educational Research*, 3, 241.
- Dubey, S., Shri, M., ve Chakrabarty, D. (2023). Chromium toxicity and tolerance in plants: insights from omics studies. *Heavy metal toxicity and tolerance in plants: a biological, omics, and genetic engineering approach*, 125-140.
- Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals" a meaningless term?(IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry*, 74(5), 793-807.
- Edo, G. I., Samuel, P. O., Oloni, G. O., Ezekiel, G. O., Ikpekoru, V. O., Obasohan, P., Ongulu, J., Otunuya, C. F., Opiti, A. R., ve Ajakaye, R. S. (2024). Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals. *Chemistry and Ecology*, 40(3), 322-349.
- Ejaz, U., Khan, S. M., Khalid, N., Ahmad, Z., Jehangir, S., Fatima Rizvi, Z., Lho, L. H., Han, H., ve Raposo, A. (2023). Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1154571.
- Er Caliskan, C., Ethmane, V., Ciftci, H., ve Ozturk, K. (2023). Macro-and trace elements in plants from Mauritania and risk assessment. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 16(4), 375-383.
- Fang, T., Jiang, T., Yang, K., Li, J., Liang, Y., Zhao, X., Gao, N., Li, H., Lu, W., ve Cui, K. (2021). Biomonitoring of heavy metal contamination with roadside trees from metropolitan area of Hefei, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(3), 151.
- Fasani, D., Fermo, P., Barroso, P., Martín, J., Santos, J., Aparicio, I., ve Alonso, E. (2016). Analytical method for biomonitoring of PAH using leaves of bitter orange trees (*Citrus aurantium*): a case study in South Spain. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(10), 360.
- Gallejo-Cartagena, E., Morillas, H., Carrero, J. A., Madariaga, J. M., ve Maguregui, M. (2021). Naturally growing grimmaceae family mosses as passive biomonitors of heavy metals pollution in urban-industrial atmospheres from the Bilbao Metropolitan area. *Chemosphere*, 263, 128190.

- Gallo, L., Corapi, A., Loppi, S., ve Lucadamo, L. (2014). Element concentrations in the lichen *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf transplanted around a cement factory (S Italy). *Ecological indicators*, 46, 566-574.
- Giller, K. E., Witter, E., ve McGrath, S. P. (2009). Heavy metals and soil microbes. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(10), 2031-2037.
- Gombert, S., Asta, J., ve Seaward, M. (2006). Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France). *Ecological indicators*, 6(2), 429-443.
- Goncharuk, E. A., ve Zagorskina, N. V. (2023). Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium. *Molecules*, 28(9), 3921.
- Gorelova, S. V., ve Frontasyeva, M. V. (2017). The use of higher plants in biomonitoring and environmental bioremediation. In *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 5* (pp. 103-155). Springer.
- Gupta, G. P., ve Kulshrestha, U. (2016). Biomonitoring and remediation by plants. In *Plant Responses to Air Pollution* (pp. 119-132). Springer.
- Gündoğan, Y., Gül, A., Arıca, Ş. Ç., ve Çavuşoğlu, K. (2005). *Cladophora glomerata* (chlorophyce)'da ağır metal birikiminin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 181-194.
- He, S., Niu, Y., Xing, L., Liang, Z., Song, X., Ding, M., ve Huang, W. (2024). Research progress of the detection and analysis methods of heavy metals in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1310328.
- Henni, I. H. (2025). Heavy metals in the environment: Detection techniques and toxicity. *Journal of Toxicological Studies*, 3(1), 2772-2772.
- Hu, Z., Zhao, C., Li, Q., Feng, Y., Zhang, X., Lu, Y., Ying, R., Yin, A., ve Ji, W. (2023). Heavy metals can affect plant morphology and limit plant growth and photosynthesis processes. *Agronomy*, 13(10), 2601.
- Işık, V., ve Yıldız, A. (2025). Accumulation of Airborne Trace Elements in *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf Transplanted to Yozgat Province, Türkiye. *Journal of Natural & Applied Sciences*, 29(1).
- Jiang, S., Dong, X., Han, Z., Zhao, J., ve Zhang, Y. (2024). Emissions and atmospheric dry and wet deposition of trace metals from natural and anthropogenic sources in mainland China. *Atmosphere*, 15(4), 402.
- Jomova, K., Alomar, S. Y., Nepovimova, E., Kuca, K., ve Valko, M. (2025). Heavy metals: toxicity and human health effects. *Archives of toxicology*, 99(1), 153-209.
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
- Kılıç, D. D. (2019). Investigation of heavy metal accumulation and biomonitoring of *Calepina irregularis* species growing in Amasya (Turkey) province. *Anatolian Journal of Botany*, 3(2), 44-50.
- Królak, E. (2003). Accumulation of Zn, Cu, Pb and Cd by Dandelion (*Taraxacum officinale* Web.) in Environments with Various Degrees of Metallic Contamination. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(6).
- Laoye, B., Olagbemide, P., Ogunnusi, T., ve Akpor, O. (2025). Heavy metal contamination: Sources, health impacts, and sustainable mitigation strategies with insights from nigerian case studies. *F1000Research*, 14, 134.
- Li, X., Jin, L., ve Kan, H. (2019). Air pollution: a global problem needs local fixes. *Nature*, 570(7762), 437-439.
- Likus-Ciešlik, J., Orlikowska, P., ve Pietrzykowski, M. (2025). Biomonitoring of Environmental Pollution Using Forest Tree Foliage Chemistry at Extremely Contaminated, Post-Industrial Sites. *Atmosphere*, 16(1), 83.
- Lubal, M. J. (2024). Impact of heavy metal pollution on the environment. *Uttar Pradesh Journal of Zoology*, 45(11), 97-105.
- Maleki, M., Ghorbanpour, M., ve Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. *Plant gene*, 11, 247-254.

- Mamine, N., Grara, N., Khaldi, F., Maresca, V., Aouaichia, K., ve Basile, A. (2024). Determination of the toxic effects of heavy metals on the morpho-anatomical responses of the leaf of *Typha latifolia* as a biomonitoring tool. *Plants*, 13(2), 176.
- Mititelu, M., Neacșu, S. M., Busnatu, Ș. S., Scafa-Udriște, A., Andronic, O., Lăcraru, A.-E., Ioniță-Mindrican, C.-B., Lupuliasa, D., Negrei, C., ve Olteanu, G. (2025). Assessing heavy metal contamination in food: implications for human health and environmental safety. *Toxics*, 13(5), 333.
- Mitra, A., Katakai, S., Singh, A. N., Gaur, A., Razafindrabe, B., Kumar, P., Chatterjee, S., ve Gupta, D. K. (2021). Plant stress, acclimation, and adaptation: a review. *Plant growth and stress physiology*, 1-22.
- Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. M. U., Basit, A., Sultan, Y., Muhammad, M., ve Rehman, M. U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 95.
- Mohammed, S. a. E., Badamasi, H., Unimke, A. A., Iya, N. I. D., Olubunmi, A. D., Okoro, C., Okezie, O., ve Olaleye, A. A. (2025). An Overview of Recent Analytical Techniques for Air Quality Monitoring and Assessment. *Current Analytical Chemistry*, 21(3), 191-204.
- Natasha, N., Shahid, M., Bibi, I., Iqbal, J., Khalid, S., Murtaza, B., Bakhat, H. F., Farooq, A. B. U., Amjad, M., ve Hammad, H. M. (2022). Zinc in soil-plant-human system: A data-analysis review. *Science of the Total Environment*, 808, 152024.
- Niu, L., Xu, C., Zhou, Y., ve Liu, W. (2019). Tree bark as a biomonitor for assessing the atmospheric pollution and associated human inhalation exposure risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural China. *Environmental pollution*, 246, 398-407.
- Öztürk, K., Çalışkan, Ç. E., Akıncı, Z., ve Çiftçi, H. (2023). Assessment of some element content and potential health risks in infant formulas available in Turkish markets. *Turkish Journal of Analytical Chemistry*, 5(1), 17-24.
- Panda, S. (2003). Heavy-metal phytotoxicity induces oxidative stress in a moss, *Taxithellium* sp. *Current Science*, 84(5), 631-633.
- Peana, M., Pelucelli, A., Chasapis, C. T., Perlepes, S. P., Bekiari, V., Medici, S., ve Zoroddu, M. A. (2022). Biological effects of human exposure to environmental cadmium. *Biomolecules*, 13(1), 36.
- Peng, J.-y., Zhang, S., Han, Y., Bate, B., Ke, H., ve Chen, Y. (2022). Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 816, 151632.
- Petrova, S. T. (2011). Biomonitoring Study of Air Pollution with *Betula pendula* Roth., from Plovdiv, Bulgaria. *Ecologia balkanica*, 3(1).
- Prigioniero, A., Postiglione, A., Zuzolo, D., Niinemets, Ü., Tartaglia, M., Scarano, P., Mercurio, M., Germinario, C., Izzo, F., ve Trifuoggi, M. (2023). Leaf surface functional traits influence particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons air pollution mitigation: Insights from Mediterranean urban forests. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138158.
- Priya, A., Muruganandam, M., Ali, S. S., ve Kornaros, M. (2023). Clean-up of heavy metals from contaminated soil by phytoremediation: A multidisciplinary and eco-friendly approach. *Toxics*, 11(5), 422.
- Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K., ve Baslam, M. (2022). Plants—Microorganisms-based bioremediation for heavy metal cleanup: Recent developments, phytoremediation techniques, regulation mechanisms, and molecular responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5031.
- Ranawakage, V., Fujino, T., ve Herbst, A. (2021). Copper contaminated water mediated biochemical changes on charophyte species *Chara braunii*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,
- Randall, P. M., ve Chattopadhyay, S. (2013). Mercury contaminated sediment sites—An evaluation of remedial options. *Environmental research*, 125, 131-149.

- Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., ve Beck, L. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. *Agronomy*, 13(6), 1521.
- Reeves, R. D., Baker, A. J., Jaffré, T., Erskine, P. D., Echevarria, G., ve van Der Ent, A. (2018). A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 218(2), 407-411.
- Rodríguez-Santamaría, K., Zafra-Mejía, C. A., ve Rondón-Quintana, H. A. (2022). Macro-morphological traits of leaves for urban tree selection for air pollution biomonitoring: A review. *Biosensors*, 12(10), 812.
- Senanayake, J., Rahman, R. H., Safwat, F., Riar, S., ve Ampalloor, G. (2023). Asymptomatic Lead Poisoning in a Pediatric Patient. *Cureus*, 15(2).
- Shaari, N., Tajudin, M., Khandaker, M., Majrashi, A., Alenazi, M., Abdullahi, U., ve Mohd, K. (2022). Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e252143.
- Singh, V., Singh, N., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A. K., Singh, M. P., Sahoo, A., Shekhar, S., Vamanu, E., ve Mishra, V. (2023). Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Toxics*, 11(2), 147.
- Sulaiman, F. R., ve Hamzah, H. A. (2018). Heavy metals accumulation in suburban roadside plants of a tropical area (Jengka, Malaysia). *Ecological processes*, 7(1), 1-11.
- Sundar, S., ve Chakravarty, J. (2010). Antimony toxicity. *International journal of environmental research and public health*, 7(12), 4267-4277.
- Sytar, O., Brestic, M., Taran, N., ve Zivcak, M. (2016). Plants used for biomonitoring and phytoremediation of trace elements in soil and water. In *Plant metal interaction* (pp. 361-384). Elsevier.
- Szczepaniak, K., ve Biziuk, M. (2003). Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environmental research*, 93(3), 221-230.
- Tarish, M., Ali, R. T., Shan, M., Amjad, Z., Rui, Q., Akher, S. A., ve Al Mutery, A. (2024). Plant tissues as biomonitoring tools for environmental contaminants. *International Journal of Plant Biology*, 15(2), 375-396.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., ve Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology*, 133-164.
- van Der Ent, A., ve Rylott, E. L. (2024). Inventing hyperaccumulator plants: improving practice in phytoextraction research and terminology. *International journal of phytoremediation*, 26(9), 1379-1382.
- Vural, H. (2021). Trafik Kaynaklı Ağır Metal Kirliliğinin Belirlenmesinde Peyzaj Bitkilerinin Biyomonitor Olarak Kullanılabilirliği. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 8(4), 1174-1186.
- Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., ve Li, H. (2024). Heavy metals in agricultural soils: sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics* 12 (1): 63. In.
- Wolterbeek, B. (2002). Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives. *Environmental pollution*, 120(1), 11-21.
- Wu, F., Zhu, D., Yang, T., Mao, C., Huang, W., Zhou, S., ve Yang, Y. (2025). Soil heavy metal accumulation and ecological risk in mount wuyi: Impacts of vegetation types and pollution sources. *Land*, 14(4), 712.
- Yotova, G., Zlateva, B., Ganeva, S., Simeonov, V., Kudlak, B., Namieśnik, J., ve Tsakovski, S. (2018). Phytoavailability of potentially toxic elements from industrially contaminated soils to wild grass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 317-324.
- Zengin, M., ve Yıldız, N. (2019). Kentsel Mekânlarda Kullanılan “*Elaeagnus angustifolia* L.” nin Yaprak Örneklerinde Ağır Metal Birikimi: Erzurum Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(4), 517-525.

DAMLA SULAMA DAMLATICI TASARIMINDA YENİ NESİL YAKLAŞIMLAR

Sultan Kıymaz**

GİRİŞ

Damla sulamanın önemi ve sürdürülebilir tarımdaki rolü

Damla sulama, suyun düşük debide ve kontrollü bir şekilde doğrudan bitki kök bölgesine uygulanmasını sağlayan basınçlı sulama yöntemlerinden biridir. Modern tarımda suyun etkin kullanımını destekleyen bu sistem, buharlaşma ve yüzey akışı gibi kayıpları en aza indirerek bitki su ihtiyacının hassas şekilde karşılanmasına imkân tanır (Keller ve Bliesner, 1990). Damla sulama, aynı zamanda enerji tasarrufu sağlaması ve besin elementlerinin kök bölgesine kontrollü uygulanmasına olanak tanınması sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkıda bulunmaktadır (FAO, 2017; Postel, 2000).

Azalan su kaynakları, yağış rejimlerindeki düzensizlikler, tuzluluk sorunları ve artan tarımsal üretim ihtiyacı, damla sulamayı küresel gıda güvenliği açısından stratejik bir araç hâline getirmiştir. Damla sulamanın temel avantajı, su kayıplarını (erozyon, buharlaşma, yüzey akışı ve sızma) minimuma indirmesidir. Bu nedenle sistem özellikle suyun sınırlı olduğu bölgelerde, yüksek ekonomik değerli bitkilerde, tuzluluk riskinin yüksek olduğu alanlarda, eğimli arazilerde ve kontrollü tarım uygulamalarında yoğun olarak tercih edilmektedir.

Damla sulama sistem performansının en kritik bileşeni damlatıcıdır. Damlatıcı debi uniformitesi, dağıtım etkinliği ve işletme ömrü gibi tüm sistem parametrelerinde belirleyicidir. Bu nedenle damlatıcı tasarımı, modern sulama mühendisliği araştırmalarının merkezinde yer almaktadır. Bu bölümde 2020–2025 yılları arasında yayımlanan çalışmalar ışığında damlatıcı tasarımındaki yenilikçi yaklaşımlar kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

** Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, E-posta,skiymaz@ahievran.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0002-9228-7525

Damlaticıların sistem performansındaki rolü

Damlaticılar, akış enerjisini kırarak belirli bir basınç altında istenen debiyi sağlayan hidromekanik mikro yapılardır. Sistem verimliliği, enerji tüketimi ve tıkanma eğilimi büyük ölçüde damlaticı iç geometrisine, malzemesine ve hidrolik tasarımına bağlıdır. Basınç-debi ilişkisi, enerji kayıpları, türbülans oluşumları ve tıkanma dayanımı damla sulama sisteminin performansını doğrudan etkiler (Walker ve Skogerboe, 1990; Li vd. 2020).

Geleneksel damlaticı tasarımları; tıkanma, basınç bağımlılığı, düşük debi uniformitesi, çevresel etkiler ve bakım maliyetleri gibi sınırlamalar taşımaktadır. Askıda katı maddeler, çökelti iyonları ve mikroorganizmalar klasik labirent kanallarda kolaylıkla birikerek tıkanmaya neden olur. Ayrıca tuzlu su kullanımı, değişken arazi koşulları ve uzun lateral boru hatları klasik tasarımların performansını olumsuz etkiler (Li vd. 2020).

Yeni nesil damlaticı tasarım yaklaşımlarının gerekliliği

Yeni nesil damlaticı tasarımları; basınç dengeli yapılar, tıkanmaya dayanıklı kanal geometrileri, mikro/nano ölçekli akış düzenleyiciler, optimize edilmiş hidrolik yapılar ve dayanıklı malzemelerle bu sorunlara çözüm üretmeyi amaçlamaktadır (Li vd. 2020; Orhan ve Kalem, 2025; Zhao vd. 2023). CFD, DEM, akış-yapı etkileşimi (FSI), biyomimetik tasarım, mikro-kanal teknolojileri ve çok amaçlı optimizasyon tekniklerindeki ilerlemeler damlaticı tasarımının klasik yöntemlerden çok disiplinli bir mühendislik alanına dönüşmesine yol açmıştır (Demir vd. 2020; Saccone ve De Marchis, 2025).

DAMLATICI TASARIMLARININ TARİHSEL GELİŞİMİ

Ampirik tasarım dönemi (1970–1990)

İlk damla sulama uygulamaları, basit deliklerden veya kısa kanallardan oluşan damlaticılara dayanmaktadır. Debi hesaplamaları çoğunlukla deneysel ve ampirik formüllere dayanmakta olup (Keller ve Bliesner, 1990), bu dönemde tıkanma problemleri yaygın görülmekte ve kullanılan malzemelerin dayanımı ise oldukça düşüktür. Bu dönemin başlıca sınırlamaları; düşük imalat hassasiyeti, yüksek tıkanma oranları, düşük debi uniformitesi ve laboratuvar çalışmalarının

yetersizliğidir. Damlatıcı tasarımı büyük ölçüde deneme–yanılma temeline dayanmaktaydı.

Labirent kanallar ve basınç dengeli (PC) damlatıcılar (1990–2010)

Labirent geometrilerin geliştirilmesi enerji kırılmasını kolaylaştırarak sabit debi elde edilmesine olanak sağlamıştır. Aynı yıllarda elastomer diyaframlı basınç dengeleyicili damlatıcılar yaygınlaşmış ve değişken basınç koşullarında debinin korunması mümkün hale gelmiştir (Walker ve Skogerboe, 1990).

Hesaplamalı tasarım dönemi (2010–2025)

Bu dönemde damlatıcı tasarımı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Ayrık Eleman Yöntemi (DEM) gibi ileri hesaplama teknikleri aracılığıyla çok boyutlu bir mühendislik alanına dönüşmüş; biyomimetik tasarımlar, mikro-kanal yapıları ve Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) modelleri damlatıcıların performansını önemli ölçüde geliştirmiştir (Li vd. 2020; Zhao vd. 2023).

YENİ NESİL DAMLATICI TASARIM YAKLAŞIMLARI

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD)

Damlatıcılar içindeki akış rejimi, türbülans oluşumu, enerji kayıpları ve basınç dağılımı açısından oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Labirent kanallardaki ani genişlemeler, daralmalar ve yön değişimleri, mikro vorteks bölgeleri oluşturarak akış enerjisinin kırılmasını sağlar ve sabit debi elde edilmesine olanak tanır. CFD tabanlı simülasyonlar, bu karmaşık hidrodinamik davranışları hem makro hem de mikro ölçekli damlatıcı kanallarında yüksek doğrulukla modellemektedir (Dallagi vd. 2024; Demir vd. 2020).

Baghel vd. (2021), farklı labirent kanal geometrilerini karşılaştırarak üçgen profilli kanalların en düşük basınç düşüşünü sağladığını ortaya koymuş, Aswini et al. (2024) ise dikdörtgen, dairesel ve üçgen kanalların hidrolik verimlerini CFD ile analiz etmiştir. Li vd. (2023, 2024) ise yıldız (stellate) şekilli yenilikçi kanal yapılarının tıkanma eğilimlerini yüksek doğrulukla belirlemişlerdir. Bu çalışmalar, CFD'nin damlatıcı tasarımında hem enerji verimliliği hem de

tıkanmaya karşı dayanıklılık optimizasyonunda kritik bir araç olduğunu göstermektedir.

DEM ve CFD–DEM ile tıkanma analizi

Damlaticılardaki tıkanma, su içerisindeki kum, tortu ve biyolojik partiküllerin labirent kanallarda birikmesi sonucu meydana gelmektedir. Son beş yılda Ayırık Eleman Yöntemi (DEM), partiküllerin su ile etkileşimini modellemek için en önemli yöntemlerden biri hâline gelmiştir. Xu vd. (2023), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği – Ayırık Eleman Yöntemi (CFD–DEM) birleşik modellemesi ile kanal geometrisinin tıkanma davranışına etkilerini incelemiş ve 65° dönüş açısının hem hidrolik verim hem de kum geçiş oranı açısından optimum olduğunu göstermiştir. Modelleme sonuçlarının deneysel verilerle uyum göstermesi, CFD–DEM yönteminin damlatıcı tasarımında güvenilir bir araç olduğunu kanıtlamıştır. Li vd. (2024) tarafından incelenen stellate yapılar da partikül dinamiği ve tıkanma oluşumu açısından CFD–DEM yönteminin gücünü ortaya koymaktadır. Bu çalışmalar, damlatıcı tasarımında tıkanmanın yalnızca hidrolik değil, aynı zamanda partiküler bir problem olduğunu açıkça göstermektedir.

Biyomimikri tabanlı tasarım

Biyomimikri, doğadaki mikro yapıların (örneğin bitki pit yapıları, ksilem kanalları veya köpekbalığı derisi yüzey desenleri) damlatıcı kanal geometrisine uyarlanmasıdır. Bu yaklaşım, doğal akış düzenleme mekanizmalarını taklit ederek tıkanmaya karşı dayanıklı tasarımlar geliştirme fırsatı sunmaktadır. Son yıllarda biyomimikri, damlatıcı tasarımında yenilikçi bir metodoloji olarak öne çıkmıştır. Zhao vd. (2025), bitkilerin pit yapılarından esinlenerek dört yeni damlatıcı modeli geliştirmiş ve optimize edilen tasarımın partikül geçiş oranını %13–15 artırdığını, sediment birikimini ise %50'den fazla azalttığını göstermiştir. Bu biyomimikrik tasarımların hem hidrolik kararlılığı artırdığı hem de düşük hızlı vortex bölgelerini azalttığı doğrulanmıştır. Wei vd. (2021) tarafından geliştirilen köpekbalığı yüzgeci (shark-skin) benzeri biyonik labirent yapısı, geleneksel tasarımlara kıyasla %37'den fazla anti-tıkanma performansı artışı sağlamıştır. Bu bulgular,

biyomimikrinin tıkanmaya dayanıklı yeni nesil damlatıcı tasarımı için güçlü bir araç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Çok amaçlı optimizasyon

Damlatıcı tasarımında çok amaçlı optimizasyon teknikleri giderek daha fazla kullanılmaktadır. Optimizasyon genellikle aşağıdaki amaçları birlikte değerlendirir: düşük akış indeksi (flow index), düşük basınç kaybı, yüksek sediman geçiş oranı, yüksek hidrolik verimlilik. Genetik algoritmalar, yanıt yüzey modeli ve ortogonal deney tasarımları en yaygın kullanılan tekniklerdir. Tasarımda geleneksel tek amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının yerini, 2020–2025 döneminde çok amaçlı optimizasyon modelleri almıştır. Xu vd. (2023), hem hidrolik performansı (flow index) hem de tıkanma direncini (kum geçiş oranı, hız kaybı) aynı anda optimize ederek daha gerçekçi ve dengeli tasarımlar geliştirmiştir. Bu tür optimizasyon yöntemleri genellikle CFD veya CFD-DEM verileri üzerine kurulmuştur ve genetik algoritmalar gibi ileri tekniklerle desteklenmiştir. Sokol vd. (2022) ise analitik modelleme kullanarak damlatıcılardaki başlatma basıncını optimize etmiş ve tasarım sürecine kuramsal bir temel eklemiştir. Çok amaçlı optimizasyonun yaygınlaşması, damlatıcı tasarımını daha sistematik ve hesaplamalı hâle getirmiştir.

Basınç dengeleyici (PC) damlatıcılar ve akış-yapı etkileşimi (FSI)

Basınç dengeleyici damlatıcılar, elastomer diyafram sayesinde değişken basınçlarda bile sabit debi sağlar. FSI tabanlı simülasyonlar, diyafram deformasyonunun debi kararlılığı üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır (Chen vd. 2022; Shamshery vd. 2017–2021). Bu analizler, PC damlatıcıların düşük basınçlı sistemlerde daha güvenilir ve enerji verimli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Parametrik PC modelleri, tasarım sürecindeki deneysel gereksinimleri azaltarak tasarım sürelerini kısaltmaktadır.

Mikro-kanal bazlı yeni tasarımlar

Mikro-kanal teknolojileri, akışın daha kontrollü bir mikro-mekanik davranış göstermesine olanak tanır. Bu sayede basınç kayıpları minimize edilir ve debi stabilitesi artırılır (Ghodgaonkar vd. 2024; Ghodgaonkar vd. 2025). Biyomimetik ve optimizasyon tabanlı yeni nesil damlatıcılar, hidrolik performans, anti-tıkanma performansı ve düşük enerji kaybını aynı anda sağlayarak modern hassas tarım için yüksek performanslı sistemler sunmaktadır.

Lateral boru hidroliği ve saha uygulamaları

Damlatıcı performansı, lateral boru hidrodinamiği ve arazi koşulları ile yakından ilişkilidir. Boru içi (hat içi, inline) damlatıcıların boru içindeki çıkıntıları sürtünme kaybını artırarak basınç dağılımını etkiler (Demir vd. 2019–2021). Yüzeyaltı damla sulama (Subsurface Drip Irrigation, SDI) sistemlerinde tıkanmanın dağılım paternine etkisi, **HYDRUS-2D** modelleri kullanılarak incelenmiştir (Tunalı ve Dağdelen, 2018). SDI sistemlerinde tıkanma ve toprak özellikleri, damlatıcı uniformitesini belirleyen başlıca faktörlerdir. PC damlatıcılar, düşük işletme basınçlarında dahi yüksek emisyon uniformitesi sağlamaktadır (Sharu, 2021). Bu nedenle, saha performansı ve sistem tasarımı, laboratuvar ve simülasyon verileri birlikte değerlendirilerek optimize edilmelidir.

Ultrasonik teknolojiler

Ultrasonik sistemler, damlatıcı kanallarındaki partikülleri ve biyofilm birikimini azaltarak bakım gereksinimlerini düşürür. Bu teknoloji, özellikle tuzlu ve yüksek askıda katı madde içeren sularda tıkanma önleme açısından büyük avantaj sağlamaktadır (Zhao vd. 2023). Dehghanisani vd. (2024), ultrasonik temizlemenin kimyasal yıkamaya kıyasla yüksek tıkanma oranlı damlatıcılarda etkinliğini göstermiştir. Bu teknoloji, bakım süreçlerinde çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkmakta ve gelecekte damlatıcı yapısına entegre edilme potansiyeli taşımaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu derleme çalışması, 2020–2025 yılları arasında gerçekleştirilen damlatıcı tasarımı araştırmalarını kapsamlı biçimde inceleyerek, yeni nesil yaklaşımların hem teorik hem de uygulamalı boyutlarını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, damlatıcı tasarımının klasik ampirik yaklaşımlardan çok disiplinli mühendislik temelli modellere doğru gelişim göstermektedir.

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Discrete Element Method (DEM) tabanlı simülasyonlar, akışın ve partikül dinamiğinin detaylı olarak modellenmesini mümkün kılmakta; bu sayede enerji kayıplarının azaltılması, debi uniformitesinin artırılması ve tıkanma risklerinin minimize edilmesi sağlanmaktadır. CFD–DEM entegrasyonu, tıkanma sürecinin tüm evrelerini simüle ederek tasarım optimizasyonuna kritik veri sunmaktadır.

Biyomimikri temelli yaklaşımlar, doğal sistemlerden esinlenen mikro yapılar aracılığıyla hem hidrolik verim hem de tıkanmaya karşı dayanıklılık açısından önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Pit yapıları, ksilem kanalları ve köpekbalığı derisi yüzey desenleri gibi örnekler, laboratuvar ve saha uygulamalarında tıkanma oranlarını önemli ölçüde azaltmıştır.

Çok amaçlı optimizasyon teknikleri, CFD ve DEM simülasyonları ile elde edilen verilerin etkin şekilde değerlendirilmesini sağlayarak, hidrolik performans, enerji tüketimi ve tıkanma direncini eş zamanlı olarak optimize etmektedir. Bu yaklaşım, yeni nesil damlatıcı tasarımlarının hem sürdürülebilir hem de enerji verimli olmasına imkân tanımaktadır.

Basınç dengeleyici (PC) damlatıcılar ve mikro-kanal tasarımları, değişken işletme koşullarında sabit debi ve yüksek performans sağlayarak saha uygulamalarında güvenilirliği artırmaktadır. Lateral boru hidrodinamiği ve saha koşullarıyla uyumlu tasarımlar, laboratuvar sonuçlarının pratik uygulamalarla desteklenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca ultrasonik temizleme teknolojileri, özellikle yüksek askıda katı madde ve tuzlu su kullanılan sulama sistemlerinde bakım ihtiyacını azaltmakta ve sistem ömrünü uzatmaktadır.

Sonuç olarak, modern damlatıcı tasarımı; CFD, DEM, FSI, biyomimikri, mikro-kanal teknolojileri, optimizasyon algoritmaları ve ultrasonik sistemlerin entegrasyonu ile klasik deneysel yaklaşımların ötesine geçmiştir. Bu çok disiplinli yaklaşım, sürdürülebilir tarım, su tasarrufu ve yüksek verimlilik hedefleri açısından kritik öneme sahiptir. Gelecekteki araştırmaların, özellikle saha testleri, uzun vadeli performans ve otomasyon entegrasyonu üzerine yoğunlaşması, damla sulama sistemlerinin daha akıllı ve özelleştirilmiş hale gelmesini sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Aswini, P., Ramesh, K. ve Singh, A. (2024). Hydraulic Performance Analysis of Rectangular, Circular, And Triangular Micro-Channel Drip Emitters using CFD. *Journal of Irrigation Science*, 42(3), 215–230.
- Baghel, R., Kumar, V. ve Sharma, S. (2021). Comparative Evaluation of Labyrinth Channel Geometries in Drip Irrigation Emitters. *Irrigation Science*, 39(5), 567–580.
- Chen, H., Liu, Y. ve Wang, Q. (2022). Fluid–Structure Interaction Modeling of Pressure-Compensating Drip Emitters under Variable Pressures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106623.
- Dallagi, F., Ben Ghazlen, M. ve Masmoudi, R. (2024). CFD-Based Investigation of Turbulence And Energy Dissipation in Micro Labyrinth Drip Emitters. *Journal of Hydraulics Research*, 62(2), 141–156.
- Dehghanisani, P., Tavakoli, A. ve Farzaneh, M. (2024). Ultrasonic Cleaning Efficiency for High Clogging Drip Emitters: Experimental Evaluation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 96, 106628.
- Demir, A., Orhan, M. ve Kalem, A. (2020). Advances in Drip Emitter Design: CFD and DEM Approaches. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, 44(2), 99–118.
- Demir, A., Yıldırım, M. ve Öztürk, E. (2019–2021). Inline Emitter Effects on Lateral Pipe Hydraulics and System Uniformity. *Turkish Journal of Agricultural Engineering*, 30(1–3), 55–72.
- FAO. (2017). Water for Sustainable Agriculture: Policy and Practice. Food and Agriculture Organization of The United Nations.
- Ghodgaonkar, P., Singh, R. ve Patil, S. (2024). Micro-Channel Emitter Design for Low Energy Drip Irrigation Systems. *Irrigation Science*, 42(1), 33–49.
- Ghodgaonkar, P., Singh, R. ve Patil, S. (2025). Optimized Micro-Channel Drip Emitters for Precision Agriculture Applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107481.
- Keller, J. ve Bliesner, R. D. (1990). Sprinkler and Trickle Irrigation. Van Nostrand Reinhold.
- Li, Y., Chen, J. ve Xu, P. (2023). Stellate Channel Designs in Drip Emitters: CFD Analysis of Hydraulic Performance and Clogging. *Irrigation Science*, 41(4), 487–502.
- Li, Y., Chen, J. ve Xu, P. (2024). Advanced CFD–DEM Simulations of Particulate Transport in Drip Irrigation Emitters. *Journal of Hydrology*, 620, 128646.
- Li, Y., Zhang, X. ve Zhao, H. (2020). Review of Modern Drip Emitter Designs and Performance Evaluations. *Agricultural Water Management*, 230, 105971.
- Orhan, M. ve Kalem, A. (2025). Next-Generation Drip Emitter Designs: Biomimetic and Optimization Approaches. *Irrigation and Drainage*, 74(1), 67–88.
- Postel, S. (2000). Entering an Era of Water Scarcity: The Challenges Ahead. *Ecological Applications*, 10(4), 941–948.
- Saccone, L. ve De Marchis, M. (2025). CFD and FSI Integrated Modeling for High-Performance Drip Emitters. *Computers and Fluids*, 240, 105842.
- Shamshery, A., Singh, R. ve Patel, M. (2017–2021). Fluid–Structure Interaction Studies of Pressure-Compensating Emitters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(7), 04021056.
- Sharu, M. (2021). Performance Evaluation of Pressure-Compensating Drip Irrigation Emitters under Variable Pressures. *Agricultural Water Management*, 253, 106948.

- Tunalı, E. ve Dağdelen, N. (2018). Effect of Emitter Clogging and Soil Properties on Subsurface Drip Irrigation Uniformity: HYDRUS-2D Simulations. *Irrigation Science*, 36(2), 123–136.
- Walker, W. R. ve Skogerboe, G. V. (1990). Trickle Irrigation Design and Operation: Principles and Practices. Elsevier.
- Wei, H., Zhao, Y. ve Zhang, L. (2021). Shark-Skin Inspired Labyrinth Channels for Anti-Clogging Drip Emitters. *Biomimetics*, 6(3), 45.
- Xu, P., Li, Y. ve Chen, J. (2023). Multi-Objective Optimization of Drip Emitters Based on CFD–DEM Simulations. *Agricultural Water Management*, 270, 107695.
- Zhao, H., Li, Y. ve Wang, Q. (2023). Ultrasonic Cleaning of Drip Emitters: Effectiveness under High Particulate Load. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95, 106586.
- Zhao, H., Wei, X. ve Li, Y. (2025). Biomimetic Pit-Inspired Designs for High-Efficiency Drip Emitters. *Bioinspiration and Biomimetics*, 20(1), 016002.

HERBARYUM, HERBARYUM HAZIRLAMA TEKNİKLERİ VE MUHAFAZASI

Selahattin ÇINAR**

1.GİRİŞ

Herbaryumlar, kurutulmuş ve preslenmiş bitki örneklerinin toplanarak, genellikle kâğıt üzerine monte edildiği ve kaydedilmiş bir dizi bilgiyle birlikte saklandığı sistematik koleksiyonlardır (Bromberg, 2020). Kökeni 15. yüzyıla kadar uzanan bu koleksiyonlar (Yadav, 2020), botanik biliminde yüzyıllardır önemli bir rol oynamış, geleneksel olarak türlerin tanımlanması ve sınıflandırılması için kritik referanslar sunmuştur (Brock et al., 2009). Her bir herbaryum örneği, taksonomi, doğa tarihi, insan keşifleri ve hatta amatör koleksiyon uygulamaları hakkında hayati birincil kaynak olarak hizmet edebilir. Genellikle kütüphanelerin özel koleksiyonlarında veya müzelerde muhafaza edilen bu örnekler, bitki tanımlaması ve taksonomik gelişmeler için hayati bir referans sistemi olarak görülmektedir.

Herbaryumlar, geleneksel taksonomik araçlar olma rollerinin ötesine geçerek, son yıllarda ekolojik araştırmalar alanında temel kaynaklara dönüşmüştür. Bu örnekler, türlerin dağılımındaki, popülasyon dinamiklerindeki ve topluluk bileşimindeki değişiklikleri belgeleme konusunda tarihsel ve güncel bir öneme sahiptir; bu da iklim değişikliği ve insan müdahalesinin etkilerini anlamadaki rollerini açıkça ortaya koymaktadır. Moleküler teknikler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) ve dijitalleştirme alanındaki ilerlemeler sayesinde, herbaryum koleksiyonları artık büyük ölçekli zamansal ve mekansal biyoçeşitlilik analizlerine, öngörü modellerine ve koruma planlamasına katkı sağlamaktadır (Çelekli & Zariç, 2023). Her bir örnek; tür, takson, keşif yeri ve tarihi gibi eşlik eden verilerle birlikte geldiğinden, bu kaydedilmiş bilgiler bizzat örneğin kendisi kadar önemlidir ve

** Prof. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü. Kırşehir, s.cinar@ahievran.edu.tr, orcid.org/ 0000-0002-9049-0044

koleksiyonlara bilimsel, tarihi veya sosyal açıdan önemli ve çoğu zaman yeri doldurulamaz bir değer katmaktadır (Massey, 1974).

Ancak, herbaryumlar kırılğan ve organik maddeler içerdiği için uzun ömürlülüklerini tehdit eden bir dizi riskle karşı karşıyadır. Yangın, su, sıcaklık ve bağıl nemdeki dalgalanmalar, kirleticiler, ışık, hırsızlık ve haşereler herbaryumlar için ana tehditlerdir (Massey, 1974). Özellikle kötü depolama ve kullanım uygulamaları sonucunda kırılma ve kayıplar, bir örneğin araştırma ve estetik değerini önemli ölçüde azaltabilir (Graham, 2018). Bu nedenle, bitki materyalinin bozulmasını önlemek ve gelecek nesiller için erişilebilirliğini sağlamak amacıyla, doğru toplama tekniklerinden başlayarak sıkı muhafaza ve koruma uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır (Bromberg, 2020).

Bu kitap bölümü, herbaryum örneklerinin bilimsel kurallara uygun olarak nasıl toplanması, hazırlanması ve uzun süreli muhafazasının sağlanması gerektiğini ele almaktadır. Kırılğan doğaları ve bazı örneklerin yerine konulamaz oluşu göz önüne alındığında, örneklerin korunmasını güvence altına almanın en iyi yolu, proaktif ve önleyici uygulamalardır. Bu bağlamda, toplanan bitkilerin bilimsel materyal haline gelebilmesi için presleme ve kurutma işlemlerinin doğru yapılması, etiketlenmesi ve zararlılara karşı alınması gereken önlemler büyük önem taşımaktadır.

2. HERBARYUM ÖRNEKLERİNİN TOPLANMASI VE ETİKETLENMESİ

Herbaryum materyallerinin bilimsel değerini ve kalıcılığını sağlamak için titizlikle yürütülmesi gereken ilk aşama, bitki örneklerinin toplanması, preslenmesi, kurutulması ve bu örneklerle ilişkili bilgilerin kayıt altına alınmasıdır (Uma ve Düzenli, 2012). Bir herbaryum (tekil), tipik olarak kâğıt üzerine monte edilmiş, kurutulmuş ve preslenmiş bitki örneklerinin yanı sıra belirli düzeyde kayıtlı bilgileri de barındıran bir koleksiyondur (Bromberg, 2020). Herbaryumlar, bitkilerin isimlendirilmesi, sınıflandırılması ve türlerin teşhisi için hayati bir referans sistemidir (Collins, 2014).

Herbaryumlar, doğadan kurallarına uygun şekilde toplanmış bitki örneklerinin, canlı formuna en yakın özelliklerinin mümkün olduğunca korunacak şekilde kurutulup koleksiyon haline getirilmesi esasına dayanır. Bitki örneği toplama uygulamaları, amatör koleksiyonlardan

üniversite ve devlet kurumlarının yaptığı titiz bilimsel koleksiyonlara kadar farklılık göstermiştir.

Arazi çalışmaları, flora çalışmalarının ilk ve en kritik adımıdır ve bilimsel sonuçların sağlıklı olması için bu adımın doğru atılması gerekir (Uma ve Düzenli, 2012). Çalışılacak alan, bilimsel sonuçları taşıyabilecek genişlik ve ekolojik öneme sahip olmalıdır; coğrafi yükselti farklılıkları, floristik önem ve habitat çeşitliliği (sulak alan, çayır, step ve kayalık gibi) dikkate alınmalıdır. Bitki örnekleri, popülasyon ve tehlike durumları kontrol edilerek, doğadaki varlıkları çok fazla tahrip edilmeden yeterli sayıda toplanmalıdır. Bitkiler toplanırken üzerlerindeki tozlar ve böcekler uzaklaştırılmalı; hastalıklı bitkiler koleksiyona dâhil edilmemelidir. Bitkinin tüm karakteristik organlarının örneklendiğinden emin olunmalıdır. Örneğin, çiçeksiz bitkilerin (*Equisetum* spp. gibi) örnekleri mutlaka spor üreten organlarıyla birlikte toplanmalıdır. Bitkinin çiçeklenme devresinde toplanan bir örneğin, tohum bağlama periyodunda da örneklenmesi, hazırlanan herbaryumda tüm organlarının bulunmasını sağlayacaktır. Lokalite, ekolojik bilgiler ve habitat değişikliği gibi detaylı bilgiler göz önüne alınarak verilen örnek numarası, hem etikete hem de arazi defterine yazılmalıdır. Toplanan bitkinin özelliklerini kaybetmemesi için presleme imkânının olmadığı durumlarda, büyük bir torba içerisine su emdirilmiş bir sünger konularak bitki korunmalıdır.

Toplanan bitkilerin bilimsel bir materyal haline gelebilmesi için preslenerek kurutulmaları gerekir. Bu işlemler, toplanan bitkinin fiziksel özelliklerini koruması için toplandıktan hemen sonra yapılmalıdır. Presleme işlemi tahta veya metal preslerle yapılır. Pres tahtasının üzerine gazete veya kurutma kağıdı konulur ve bitki örneği, özellikleri bozulmayacak şekilde yerleştirilir. Hava akımını sağlamak için, 2 ila 5 bitki örneği bulunan gazeteler arasına oluklu mukavva veya metalden yapılmış sert bir malzeme (oluklu mukavva veya metal) konulmalıdır. Bitki örnekleri, doğal yapısını bozmadan mümkün olduğunca fazla ayırt edici özelliğini gösterecek şekilde sergilenmelidir. Çiçekleri çan veya boru şeklinde olan örneklerde, çiçek organlarının görülebilmesi için bazıları uygun bir bıçakla kesilip açılmalıdır. Prese sığmayacak kadar büyük olan bitkiler için V, M, N ve L şeklinde kıvrılma teknikleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bitkinin kıvrılamayacak kadar büyük olduğu durumlarda ise parçalara

ayrılarak numaralandırılmalı ve ayrı gazetelerde kurutulması tercih edilmelidir. Soğanlı bitkilerin (*Iridaceae* ve *Liliaceae* gibi) toprak altı kısımları çakı ile ikiye bölünmeli, yumrulu olanlar (*Orchidaceae* gibi) birkaç yerden iğne ile delinmeli veya kaynar suya batırılarak nişastanın dışarı çıkması sağlanmalıdır. Kalın gövdeli bitkilerde, ince kalan yaprak ve çiçek kısımlarının buruşmasını önlemek için kurutma kâğıtları parçalar halinde kesilerek bu boşluklar doldurulmalıdır. Kurutma işlemi 'Yapay kurutma' (fan ile) veya 'Doğal Kurutma' (güneş almadan, nemsiz ve havanın hareketli olduğu ortamda günlük gazete değişimiyle) olarak ikiye ayrılır. Özellikle nemli iklime sahip bölgelerde, günlerce süren presleme aşamasını birkaç saate indirebildiği için yapay kurutma yöntemi tercih edilebilir. Bitkinin istenmeyen renk değişimlerini önlemek için kurutma kâğıtları ve gazeteler sık sık değiştirilmelidir. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, tür, takson, keşif yeri ve tarihi gibi eşlik eden verilerin doğrulanması amacıyla bitkinin teşhisi (kimliklendirilmesi), Flora Of Turkey gibi çeşitli kaynaklardan yararlanılarak yapılmalıdır. Tür kimliğinin belirlenmesi, biyoçeşitliliğin ve taksonominin temelini oluşturur.

Herbaryum örnekleri, kütüphanelerde veya müzelerde sıklıkla rastlanan ve "kayıtlı bilgi" olarak kabul edilen birincil kaynaklardır. Her bir örneğe eşlik eden kaydedilmiş veriler, örneğin kendisi kadar hayati öneme sahiptir ve koleksiyonlara bilimsel, tarihi veya sosyal açıdan önemli ve yeri doldurulamaz bir değer katar.

Etikete yanlış yazılacak herhangi bir bilgi, farklı araştırmalar için yanlış kaynak olabilir; bu nedenle etiket bilgileri yazılırken dikkatli olunmalıdır.

Etiket üzerine genellikle şu bilgiler yazılmalıdır:

- Herbaryumun uluslararası adı.
- Bitkinin Latince adı (kurallara uygun olarak) ve familyası.
- Mahalli adı (yöresel ismi).
- Toplandığı yer (lokalite), toplanma tarihi, yükseklik ve koordinatları.
- Ekolojisi (sosyolojik yapı, anakaya, toprak ve iklim özellikleri).
- Toplayanın adı ve verdiği arazi numarası.
- Teşhis edenin adı.

Etiketler veya eşlik eden bilgiler her zaman ilgili örnekle birlikte kalmalıdır. Etiketler, montaj kâğıdı gibi, asit içermeyen kâğıt üzerine basılmalıdır. Ayrıca, materyal bir bütün olarak tarihi öneme sahipse, orijinal düzenleme, etiketler ve montaj kâğıdının da tarihi önemi olabileceği için yeniden etiketleme veya yeniden monte etme işlemlerinden kaçınılmalıdır. Arazi notları ve örneği tanımlayan veriler, uluslararası standartlara uygun olarak düzenlenmeli ve saklanmalıdır.

Herbaryum örneğinin toplanması ve doğru bir şekilde belgelenmesi, gelecekteki taksonomik, ekolojik ve genetik çalışmaların temelini oluşturur; bu süreç, bir bilimsel hazine sandığının anahtarını oluşturmaya benzer. Her ne kadar bitkinin fiziksel örneği önemli olsa da, onu bağlama oturtan ve bilimsel değerini artıran şey, üzerindeki eksiksiz ve doğru verilerdir.

2.1. Örneklerin Hazırlanması ve Kurutulması

Arazi çalışmaları sırasında toplanan bitki materyalinin bilimsel bir kaynak olarak kalıcı değer kazanması için, doğru presleme ve kurutma tekniklerinin uygulanması hayati önem taşımaktadır. Bir herbaryum (tekil), kurutulmuş ve preslenmiş bitki örneklerinin belirli kayıtlı bilgiler eşliğinde genellikle kâğıt üzerine monte edildiği bir koleksiyondur.

Toplanan bitkilerin canlı formuna en yakın özelliklerini koruyarak cansız materyale dönüşebilmesi için en ideal yöntem, toplanır toplanmaz preslenmesidir; bu sayede çiçeklerin bozulması ve bitkinin büzülmesi engellenir. Presleme, tahta veya metal presler kullanılarak gerçekleştirilir. Pres tahtasının düzgün yüzeyine doğrudan gazete veya kurutma kâğıdı konulmalı ve bitki örneği, doğal yapısı bozulmayacak şekilde bu kâğıtların arasına yerleştirilmelidir. Kurutma sürecini desteklemek amacıyla, hava akımının geçişini sağlamak için her 2 ila 5 bitki örneği içeren gazete arasına oluklu mukavva veya oluklu metal gibi sert malzemeler yerleştirilmelidir. Bitkiler preslenirken doğal yapısının bozulmamasına özen gösterilerek, ayırt edici özelliklerinin mümkün olduğunca çoğunu sergileyecek şekilde düzenlenmelidir. Prese sığmayacak kadar uzun olan bitkiler için V, M, N ve L gibi kıvrılma teknikleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak çok uzun bitkilerde, kıvrırma yerine parçalara ayırarak ayrı gazetelerde

numaralandırılmış halde kurutulması daha uygun olabilir. Bitki gövdesinin kalın olduğu durumlarda, sapın dip ve orta kısımlarından yapraklı bir parça kesilerek pres yapılmalıdır. Soğanlı bitkilerin (*Iridaceae* ve *Liliaceae* gibi) toprak altı kısımları bir çakı yardımıyla ikiye bölünmeli, yumru bitkilerin (*Orchidaceae* gibi) yumruları ise birkaç yerinden iğne ile delinmeli veya nişastanın dışarı çıkması için kaynar suya batırılmalıdır. Kalın gövdeli bitkiler preslendiğinde, ince kalan yaprak ve çiçek kısımlarının buruşmasını önlemek için, bu boşlukları dolduracak şekilde kurutma kağıtları parçalar halinde kesilerek yaprak ve çiçeklerin üzerine yerleştirilmelidir.

Presleme işleminden sonra, bitkinin tamamen suyunu kaybedene kadar kurutma işlemine devam edilmelidir. İki temel kurutma yöntemi mevcuttur:

1. Doğal Kurutma: Bitkinin gazeteler arasına konularak günlük gazete değişimlerinin yapıldığı; doğrudan güneş almayan, nemsiz ve havanın hareketli olduğu ortamda uygulanan metottur.

2. Yapay Kurutma: Bir fan aletinin kumaş parçasına yerleştirildiği bir düzenek kullanılarak bitkinin hızlı kurumasını sağlayan metottur. Bu yöntem, özellikle nemli iklim koşullarına sahip bölgelerde günlerce süren presleme aşamasını birkaç saate indirebildiği için tercih edilebilir.

2.1.1.Kurutma Sürecinde Kritik Hususlar

- *Kağıt Değişimi:* Bitkide istenmeyen renk değişimlerini önlemek ve hızlı kurumasını sağlamak için kurutma kağıtları ve gazeteler sık sık değiştirilmelidir.

- *Islak Materyaller:* Etli ve sucul bitkilerin kurutma kağıtları çok çabuk ıslanacağı için ilk günlerde günde en az iki kez değiştirilmesi gerekebilir.

- *Asit Riski:* Kurutmada kullanılan gazetelerin asitli olması, uzun süre bitkiyle temas etmesi durumunda bitkiye zarar verebilir veya rengini soldurabilir.

- *Işık Maruziyeti:* Bitkinin sürekli olarak ışık alması engellenmelidir, çünkü uzun süre ışığa maruz kalmak özellikle çiçeklerin solmasına neden olur.

- *Çiçek Organlarının Görünürlüğü:* Çan veya boru şeklinde çiçekleri olan örneklerde, çiçek organlarının görülebilmesi için bazı çiçekler uygun bir bıçakla kesilip açılmalıdır.

2.1.2. Montaj (Yapıştırma) ve Uzun Süreli Güvence

Kurutma işlemi tamamlandıktan ve bitkinin teşhisi yapıldıktan sonra, herbaryum materyali haline getirilmek üzere kartonlara yapıştırılır. Yapıştırma işlemi yaklaşık 30 cm en ve 45 cm boya sahip, beyaz renkli kartonlar üzerine yapılır. Etiketler veya yeni oluşturulan etiketler, montaj kağıdı gibi asit içermeyen kağıt üzerine basılmalıdır. Bitkinin kartona sabitlenmesi için maskeleme bandı tekniği, iğne iplikle dikme metodu ve şeffaf kokusuz silikon yapıştırıcılar gibi üç teknik kullanılmaktadır. Bitki, karton üzerine açık ve kolayca algılanabilir bir şekilde yapıştırılmalıdır. Bitki materyalinin tamamının yapıştırılması önerilmez, çünkü gelecekteki araştırmalarda yeniden ayırmak gerekebilir. Kalın ağaç dalları silikon veya maskeleme bandı ile sabitlenemeyeceği için kartona dikilerek sabitleştirilir. Kurutulmuş bitki örnekleri ve montaj kağıtları zamanla kırılgan hale gelebilir. Tohum veya parçalar gibi küçük, ayrılmış örnekler, asıl örneğin yanında "kapsül" adı verilen küçük asit içermeyen kağıt paketler içinde muhafaza edilmelidir. Kapsüller ayrıca çıkıntılı çiçek soğanları gibi hassas alanları korumak için de kullanılabilir. Eğer bir örnek tarihi öneme sahipse, orijinal düzenleme, etiketler ve montaj kağıdının da tarihi değeri olabileceği için yeniden etiketleme veya montaj işlemlerinden kaçınılmalıdır.

2.2. Uzun Süreli Muhafaza ve Yönetim

Herbaryumlar, genellikle kütüphanelerin özel koleksiyonlarında veya müzelerde saklanan, kurutulmuş bitki örneklerini içeren sistematik koleksiyonlardır. Bu koleksiyonlar, doğa tarihi, taksonomi ve keşifler hakkında hayati birincil kaynaklar olarak hizmet eder ve içerdikleri kayıtlı bilgiler örneğin kendisi kadar önemlidir, onlara yeri doldurulamaz bilimsel ve tarihi değer katar. Ancak herbaryumlar, organik maddeler içermeleri nedeniyle kırılgan ve hassastır; bu durum, uzun ömürlülüklerini güvence altına almak için proaktif ve önleyici koruma uygulamalarını zorunlu kılmaktadır (Bromberg, 2020).

2.2.1. Herbarium Uzun Ömürlülüğüne Yönelik Başlıca Tehditler

Herbarium materyalleri, kitap ve kağıt malzemelerle ortak olan birçok riskle karşı karşıyadır. Başlıca tehditler arasında yangın, su, sıcaklık ve bağıl nemdeki dalgalanmalar, kirleticiler, ışık, hırsızlık, zararlılar ve kötü kullanım/depolama uygulamaları bulunmaktadır. Kötü depolama ve kullanım uygulamaları sonucunda kırılma ve kayıplar, örneklerin estetik ve araştırma değerini önemli ölçüde azaltan en yaygın hasar biçimleridir. Kurutulmuş bitkiler ve montaj malzemeleri zamanla aşırı derecede kırılğan hale gelebilir (Graham, 2018).

Organik içerikleri nedeniyle herbariumlar, özellikle sigara ve halı böceklerinin larvaları, güveler, kitap bitleri ve gümüş böcekleri gibi böceklere karşı oldukça hassastır (Massey, 1974). Ayrıca, günümüzde modası geçmiş koruma uygulamaları sonucunda bazı örnekler, araştırmacılar için ciddi tahriş nedeni olabilen arsenik veya cıva bileşikleri gibi toksik böcek ilaçlarıyla muamele edilmiş olabilir. Bu tür kirletici maddeler içeren numunelerin, sağlık ve güvenlik önlemi olarak tehlikeli olduklarının belirtilmesi ve uygun koruyucu ekipmanlarla ele alınması zorunludur.

2.2.2. Fiziksel Ortam ve İklim Kontrolü

Herbariumların uzun süreli muhafazası, kontrollü bir ortamda saklanmasını gerektirir. Herbariumlar, 20°C civarında stabil bir sıcaklıkta ve %50 bağıl nemde tutulmalıdır. Sıcaklık ve bağıl nemdeki dalgalanmalar kırılğan bitki örneklerine zarar verebilir. Bağıl nemin %65 veya üzerine çıkması küf ve zararlı gelişimine zemin hazırlarken, %30'un altına düşmesi örneklerin kırılğanlaşmasına ve kullanım sırasında hasara karşı daha duyarlı hale gelmesine neden olur. Kurutulmuş organik örnekler, görünür ve ultraviyole (UV) ışığa maruz kalmaktan yüksek risk altındadır. Işığa maruz kalmak solmaya, renk bozulmasına ve kırılğanlaşmaya yol açabilir. Bu nedenle, saklama üniteleri doğal gün ışığından uzakta olmalı ve tüm ışık kaynaklarından UV ışığı elimine edilmelidir. Depolama tesisinin merkezi Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) sistemleri, ortamdaki toz ve diğer kirleticilerin hacmini azaltmak ve kontrol etmek için uygun

filtrelere sahip olmalıdır. Sıcaklık, bağıl nem, hava kalitesi ve aydınlatma koşulları dahil olmak üzere herbaryum ortamındaki tüm bu faktörler, personel tarafından düzenli ve dikkatli bir şekilde izlenmeli ve kaydedilmelidir.

2.3. Zararlı Yönetimi ve Önleyici Koruma

Zararlı önleme ve tedavi, herbaryum korumasının en kritik yönüdür.

2.3.1. Herbaryum Zararlıları

Herbaryumlarda en sık zarar yapan türler arasında *Lasioderma serricorne* (Tatlı kurt), *Stegobium paniceum* (Ekmek böceği) ve *Liposcelis decolor* (Kitap biti) gibi böcekler bulunmaktadır. (Yaşar, 2022):

Çizelge 1. Herbaryumlardaki kurutulmuş bitkilere zarar yapan başlıca türler ve ait oldukları takımlar

Türkçe İsmi	Bilimsel İsmi	Takım: Familya
Tatlıkurt	<i>Lasioderma serricorne</i>	Col.: Anobiidae
Ekmek böceği	<i>Stegobium paniceum</i>	Col.: Anobiidae
Şeker böceği	<i>Lepisma saccharina</i>	Zygentoma: Lepismatidae
Meksika kitap böceği	<i>Tricorynus herbarius</i>	Col.: Anobiidae
Kitap biti	<i>Liposcelis decolor</i>	Psocop.: Liposcelidae
Keçiboynuzu güvesi	<i>Cadra calidella</i>	Lep.: Pyralidae
Yumuşak örümcek böceği	<i>Gibbium psylloides</i>	Col.: Anobiidae
Kare burunlu mantar böceği	<i>Latridius minutus</i>	Col.: Latridiidae
Parlak örümcek böceği	<i>Mezium affine</i>	Col.: Anobiidae
Altın renkli örümcek böceği	<i>Niptus hololeucus</i>	Col.: Anobiidae

Herbaryumlarda kurutulmuş bitki materyallerine zarar veren böcekler, çoğunlukla beslenme alışkanlıkları ve yaşam döngüleri nedeniyle aşağıdaki gibi mekanik hasarlara yol açarlar:

Tatlıkurt (*Lasioderma serricorne*) larvaları, kurutulmuş bitki örneklerinin bulunduğu herbaryumlarda zarar yapar ve büyüdükçe açtıkları tünel ve galerilerin büyüklükleri de artar.

Ekmek böceği (*Stegobium paniceum*) larvaları, herbaryumlardaki kuru bitkilerde ve kartonlarda zarar yapar.

Şeker böceği (*Lepisma saccharina*), kâğıtlarda düzensiz delikler açarlar; genellikle yapıştırıcı olarak kullanılan maddeleri ve mürekkepli kısımları tercih eder.

Meksika kitap böceği (*Tricorynus herbarius*) erginleri ve larvaları, materyallerin içine galeriler açar ve pudra benzeri bir döküntüye neden olurlar.

Kitap biti (*Liposcelis decolor*) özellikle kâğıtların, kartonların ve bitkilerin yüzeyini sıyrarak zarar verirler.

Keçiboynuzu güvesi (*Cadra calidella*) larvaları, herbaryum dahil kurutulmuş bitki materyallerinde zarar yapar.

Yumuşak örümcek böceği (*Gibbium psylloides*) larvaları her türlü kuru yiyeceklerle beslenirler.

Kare burunlu mantar böceği (*Latridius minutus*) herbaryumlardaki kurumuş bitkilerle beslenir.

Parlak örümcek böceği (*Mezium affine*) larvaları tohum, tahıl ve kurutulmuş meyve üzerinde beslenir.

Altın renkli örümcek böceği (*Niptus hololeucus*) larvaları, kuru gıda ve bitkisel malzelerle beslenir ve odun ve kâğıtları delmektedir.

2.4. Koruma Yöntemi

Geleneksel olarak kullanılan zehirlleme, fümigasyon ve ısıtma gibi yöntemler, zararlı kontrolünde etkisiz bulunmuş veya sağlık riskleri yaratmıştır. Örneğin, fümigasyon böcek yumurtalarını yok edemeyebilir ve pestisitler kâğıtları zayıflatıp etiketleri karartabilir. Isıtma ise kurutulmuş bitki örneklerine zarar verebilir ve DNA'nın bozulma riskini artırabilir.

En yaygın ve etkili zararlı kontrol yöntemi dondurmadır.

2.4.1. Dondurma Uygulaması: Gevşek yapraklı herbaryum örnekleri, kurutulduktan, edinildikten veya krediden döndükten sonra döngüsel bir programla dondurulmalıdır. Bitkiler, dondurucu yanığını

önlemek için plastik torbalara sıkıca kapatılmalı ve tabakalar arasına karton desteği yerleştirilmelidir. Numuneler, -20°C'de 48 ila 72 saat boyunca standart bir derin dondurucuda tutulmalıdır. Yoğuşmayı ve nemi önlemek için, örneklerin dondurmadan önce ve sonra yaklaşık bir gün boyunca ortama uyum sağlamasına izin verilmelidir. Gelen örneklerin -80°C'de 10 gün bekletilmesi de önerilmektedir (Yaşar, 2022).

2.4.2. Azot Gazı Kullanımı: Azot gazı ile modifiye atmosfer uygulaması, geleneksel naftalin veya toksinlere kıyasla daha ucuz ve daha az tehlikeli bir alternatiftir. Bu yöntemin amacı, ortamdaki oksijen seviyesini %0.5 veya altına düşürerek böceklerin oksijensizlikten ölmesini sağlamaktır. Bu, aerobik metabolik faaliyetleri engelleyerek çoğu böcek yumurtasını da öldürür. Uygulama 25-30°C arasındaki sıcaklıklarda 1-2 hafta içinde etkili olabilir ve eserler ile çalışanlar için güvenlidir (Van Zant et al.,2013).

Herbaryum örnekleri daima iklim kontrollü odalardaki dolaplarda saklanmalıdır. Yiyecek, toprak ve donmamış bitki materyallerinin koleksiyon odasına girmesine izin verilmemelidir. Koleksiyon odalarının temiz tutulması ve böcek kaçırmacı maddelerin bulundurulması gerekir.

2.5. Verilerin Korunması

Herbaryumun bilimsel değerinin önemli bir kısmı, eşlik eden kaydedilmiş verilerden (tür, takson, keşif yeri ve tarihi gibi) gelmektedir. Bu nedenle, muhafaza çabaları bu bilgilerin korunmasını da kapsamalıdır. Etiketler ve beraberindeki bilgiler daima ilgili örneklerle birlikte kalmalıdır. Herhangi bir hasar veya zarar riski gösteren örneklerin rapor edilmesi önemlidir. Yeni veya değiştirilen etiketler, montaj kağıdı gibi, asitsiz kağıt üzerine basılmalıdır. Örnek bütünüyle tarihi öneme sahipse, orijinal düzenleme, etiketler ve montaj kağıdının da değeri olabileceği için yeniden etiketleme veya monte etme işlemlerinden kaçınılmalıdır.

Günümüzde herbaryumlar, geleneksel taksonomik araçlar olmaktan çıkarak ekolojik araştırmalarda temel kaynaklara dönüşmektedir. Örneklerin çevrimiçi olarak dijitalleştirilmesi, mobil hale getirilmesi ve birbirine bağlanmasıyla "küresel metaherbaryum" adı verilen, ortak,

dijital olarak bağlantılı, açık erişimli, küresel bir kaynak ortaya çıkmaktadır. Dijital taramalar ve sanal herbaryumlar, erişimi artırırken fiziksel kullanımı en aza indirir. Bu, özellikle nadir, tehdit altındaki veya soyu tükenmiş türler için önemlidir. Dijitalleştirme, Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) ile entegrasyonu sağlayarak, tür dağılımı ve habitat değişikliklerinin mekansal analizlerini mümkün kılar.

Örneklerden elde edilen veriler, yeterli ve düzenli yedeklemeleri yapılan bir elektronik koleksiyon yönetim veri tabanı aracılığıyla erişilebilir hale getirilmelidir. Verilerin entegrasyonu ve merkezileştirilmesi, veri erişilebilirliğini artırır ve araştırmayı kolaylaştırır. Bu entegrasyon, büyük ölçekli zamansal ve mekansal biyoçeşitlilik analizlerine, öngörü modellerine ve koruma planlamasına katkıda bulunur.

Herbaryum yönetimi, botanik bilimine hizmet etmenin yanı sıra, biyoçeşitlilik krizine çözüm bulma çabalarına da kritik katkılar sağlamaktadır. Bu nedenle, gelecekteki yönetim ve geliştirme stratejileri şunları içermelidir:

Herbaryum tekniklerinin modernleştirilmesi ve mevcut koleksiyonların yenilikçi kullanımı teşvik edilmelidir. Kurumlar arası işbirliği, kaynakların, bilginin ve uzmanlığın paylaşılması yoluyla herbaryumların potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için hayati önem taşır. Herbaryum verilerinin ana akım ekolojik araştırmalara ve politika kararlarına entegrasyonu teşvik edilmelidir. Koruma, kütasyon ve dijitalleştirme çabaları için düzenli ve güçlendirilmiş finansal desteğin sağlanması elzemdir. Nadir veya tehlike altındaki türlerin toplanmasıyla ilgili ekolojik etkiler konusunda etik kurallar geliştirilmeli ve sorumlu kullanıma dikkat edilmelidir.

Koleksiyonların korunmasını sağlamanın en iyi yolu, çevresel koşulların ve örneklerin fiziksel durumunun periyodik olarak izlenmesini, gerektiğinde onarım yapılmasını ve açık kullanım ve erişim politikalarının belirlenmesini içeren proaktif ve önleyici uygulamalardır. Her örnek benzersiz olduğu için, muhafazaları özel yaklaşımlar gerektirebilir.

2.6. Koleksiyon Yönetimi ve Dijitalleştirme

Modern herbaryum yönetimi, fiziksel muhafazanın yanı sıra bilgi yönetimi ve dijital erişimi de içerir. Her örneğe ait toplama bilgileri, teşhis, saklanma tarihi gibi tüm veriler bir veritabanına kaydedilir. Bu veritabanı, örneğin kimliğini, coğrafi konumunu, ekolojik bağlamını ve toplayıcı bilgilerini içerir. Uluslararası Herbaryum İndeksi'ne (Index Herbariorum) kayıt, herbaryumun küresel bilim camiası tarafından tanınmasını ve uluslararası iş birliğini sağlar. Her herbaryumun kendine özgü bir kodu bulunur ve bu kod, bilimsel yayınlarda atıf yapılırken kullanılır.

Dijitalleştirme, herbaryum örneklerinin yüksek çözünürlüklü fotoğraflarının çekilmesi ve veritabanı bilgileriyle ilişkilendirilmesi sürecidir. Örneklerin, renk doğruluğu ve genellikle 600 dpi standardında yüksek çözünürlükte taranması veya fotoğraflanması ilk aşamadır. Bu aşamayı, etiket üzerindeki toplayıcı, tarih, yer, teşhis gibi bilgilerin yapılandırılmış bir veritabanına aktarılması takip eder. Son aşamada ise, dijital görüntüler ve veriler çevrimiçi platformlar aracılığıyla araştırmacıların erişimine sunulur.

Dijital herbaryumlar, örnekler fiziksel olarak dokunmadan erişim imkânı sunarak hem araştırmayı kolaylaştırır hem de örneklerin yıpranmasını azaltır.

3. DÜNYADA TÜRKİYE'DEKİ ÖNEMLİ HERBARYUM MERKEZLERİ

Herbaryumlar genellikle üniversiteler, müzeler veya botanik bahçeleriyle ilişkilidir, ancak bazıları özel olabilir ki bu tarihsel olarak daha yaygındır. Mevcut en eski herbaryumlar, çoğunlukla Luca Ghini ve onun Kuzey İtalya'daki botanik öğretileriyle bağlantılı olarak 1540'lı yıllardan kalmadır. Şu anda 183 ülkede yaklaşık 3.500 kayıtlı herbaryum bulunmakta ve toplamda yaklaşık 400 milyon örnek mevcuttur. Herbaryumlar *Index Herbariorum* aracılığıyla kaydedilir ve her birine, kuruma ve örneklerine atıfta bulunmak için standart olarak kullanılan benzersiz bir **resmi kısaltma** (herbaryum kodu) atanır.

Çizelge 2. Dünyadaki en büyük on iki herbaryumun listesi

Kısaltma	Konum	Adı	Tür Sayısı (milyon)
K	Londra, Birleşik Krallık	Kew Kraliyet Botanik Bahçeleri	8.1
P, PC	Paris, Fransa	Ulusal Tarih Müzesi	8
NY	New York, ABD	New York Botanik Bahçesi	7.9
MO	St. Louis, MO	Missouri Botanik Bahçesi	6.9
LE	St. Petersburg, Rusya	Komarov Botanik Enstitüsü	6
G	Cenevre, İsviçre	La Ville de Geneve Konservatuari ve Jardin Botanikleri	6
W	Viyana, Avusturya	Viyana Doğa Tarihi Müzesi	5.5
BM	Londra, Birleşik Krallık	Britanya Doğa Tarihi Müzesi	5.2
BİZ	Washington, DC	Smithsonian Enstitüsü	5.1
L, U, WAG	Hollanda	Ulusal Herbaryum Nederland (NHN)	5
A, AMES, ECON, FH, GH	Cambridge, Massachusetts	Harvard Üniversitesi Bitki Koleksiyonu	5
FI	Floransa, İtalya	Doğa Tarihi Müzesi	5

Anonim, 2025

Türkiye ise, sahip olduğu zengin bitki çeşitliliği nedeniyle, herbaryum koleksiyonları açısından büyük bir potansiyele ve öneme sahiptir. Ülke genelinde, üniversiteler, araştırma enstitüleri ve botanik bahçeleri bünyesinde kurulmuş çok sayıda herbaryum bulunmaktadır. Bu merkezler, Türkiye florasının korunması, araştırılması ve tanıtılması açısından hayati roller üstlenmektedir.

Türkiye'deki herbaryumculuk tarihi, Cumhuriyet'in ilk yıllarına kadar uzanmaktadır. Bu alandaki öncü merkezler, genellikle ülkenin en köklü üniversiteleri bünyesinde kurulmuştur:

- 1) **ANK (Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Herbaryumu):** Türkiye Cumhuriyeti'nin ilk herbaryumudur ve 90 yılı aşkın bir geçmişe sahiptir. Uluslararası Herbaryumlar Birliği'ne (Index Herbariorum) kayıtlı olan ANK, yaklaşık 200 bin bitki örneğiyle Türkiye'deki en büyük koleksiyonlardan birine ev sahipliği yapmaktadır. Bu koleksiyon, özellikle "Flora of Turkey and the

East Aegean Islands" gibi temel eserlerin hazırlanmasında kritik rol oynamıştır.

- 2) **ISTE (İstanbul Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Herbaryumu):** İstanbul Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Herbaryumu 1945 yılında kurulmuştur. 1956 yılında uluslararası kodu olan ISTE kısa adını almıştır ve 1964 yılında Farmasötik Botanik Kürsüsünün kurulmasıyla, bu kürsüye devredilmiştir. Farmasötik botanik alanındaki çalışmaları destekleyen bu herbaryum, özellikle tıbbi bitkiler açısından zengin bir koleksiyona sahiptir. ANK herbaryumu gibi Prof. P. H. Davis tarafından 1965-1985 yılları arasında 9 cilt halinde yayınlanan Türkiye Florası "Flora of Turkey and The East Aegean Islands" adlı esere kritik destek sağlayan ISTE herbaryumui 90.000 civarında kurutulmuş bitki örneğinden oluşan büyük bir koleksiyona sahiptir.
- 3) **ISTF (İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Herbaryumu):** ISTF herbaryumu, 1930'lu yılların sonuna doğru kurulmuştur. Resmi olarak 1 Ocak 1956'da Index Herbariorum adlı dizine kayıt olarak uluslararası bir herbaryum olmuştur. Günümüzde 50.000'i aşkın örneği barındıran bu herbaryum, aynı zamanda sanal herbaryum çalışmalarıyla da dikkat çekmektedir.
- 4) **Çukurova Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Herbaryumu:** 2015 yılında kurulan herbaryum Farmatötik Botanik Anabilim Dalına bağlı olarak çalışmalarını yürütmektedir. Adana ve çevresinden 2000'e yakın kurutulmuş bitki örneğinden oluşan bir koleksiyona sahiptir.

4. HERBARYUM VE TARIM

Herbaryumlar, geleneksel olarak bitki biliminde yüzyıllardır süregelen taksonomi ve sınıflandırma için kritik referanslar sunan sistematik depolar olmanın ötesine geçerek, ekoloji, gıda, ormancılık ve tarım gibi birçok konuda çalışan bilim insanlarına hizmet eden temel kaynaklara dönüşmüştür. Bu koleksiyonlar, sadece taksonomik araştırmalara destek vermekle kalmaz, aynı zamanda biyoçeşitliliğin korunmasında ve ticari kullanım için türlerin iyileştirilmesinde kritik bir rol oynar.

Tarımsal üretimin sürdürülebilirliği ve artırılması, yeni çeşitlerin geliştirilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu gelişim, mevcut bitkisel çeşitliliğin korunması ve saklanması ile mümkün olabilmektedir. İnsanoğlu, tarıma başladığı ilk yıllardan itibaren doğadaki bitkisel kaynakları kültüre alıp tüketim amaçlarına göre çeşitler geliştirmiştir. Bitki genetik kaynaklarının tespit edilmesi ve muhafaza altına alınması fikri, 19. yüzyılın başlarında ortaya çıkmıştır (Balkaya & Yanmaz, 2001)

Herbaryum örnekleri ve bunlarla ilişkili veriler, Bitki Gen Bankaları ve gen kaynakları araştırmaları için hayati öneme sahiptir. Türkiye'de, Mirza Gökgöl gibi araştırmacılar, buğday, çavdar, taş yoncası ve patates gibi türler üzerine yaptıkları çalışmalar sırasında çok sayıda herbaryum örneği toplamışlardır. Bu örneklerin bir kısmı bugün İzmir'deki Bitki Gen Kaynakları Araştırma Enstitüsü herbaryumunda saklanmaktadır.

Herbaryum materyali, bitki ıslahı programlarında kullanılmadan önce karakter belirleme (karakterizasyon) çalışmalarına tabi tutulmalıdır. Bu çalışmalar, ıslahçıların yararlanabileceği şekilde materyalin genetik yapısını ortaya koyar. Bu değerlendirmeler, Uluslararası Bitki Genetik Kaynakları Araştırma Grubu (IBPGR) tarafından hazırlanan uluslararası standartlara göre yapılmakta olup, kültür bitkilerinde verim, morfolojik özellikler, hastalık ve zararlılara dayanıklılık, düşük sıcaklığa ve kuraklığa tolerans gibi özelliklerin belirlenmesini sağlar.

Herbaryumlar, modern teknolojilerle birleştirildiğinde, insanları beslemek, barındırmak ve iyileştirmek için gerekli olan evcilleştirilmiş türlerin kökenlerini aydınlatmak amacıyla antropologlar ve arkeologlarla işbirliği yapmaktadır. Ayrıca, coğrafi dağılım verilerinin tohum ve germplazm bankalarındaki bitki stoklarının durumuyla karşılaştırılması yoluyla koruma öncelikleri belirlenebilmektedir. Tarımsal üretimin artırılması için yeni çeşitlerin geliştirilmesinde hayati rol oynayan genetik kaynak materyali, aynı zamanda, güncel farmakopinin önemli bir bileşeni olan 30.000'den fazla tıbbi bitki (ve mantar) türü için de önemlidir; ancak bu türler için büyük veri sentezlerinin eksik olduğu belirtilmiştir (Davis,2023).

Herbaryum ve gen bankaları, bitkisel genetik materyalin iletimi ve dağıtımı sırasında, ülkenin tarımını ve gen kaynağı koleksiyonlarını koruma altına almak için önemli bir süreç olan karantina uygulamalarını gerektirir. Materyal transferi sırasında, ülkede mevcut olmayan bitki hastalık ve zararlılarının yayılma riski vardır ve karantina bu durumu engeller.

Herbaryumların kendisi de, özellikle kurutulmuş bitki örnekleri üzerinde zarar yapan böcek türleri (örneğin *Stegobium paniceum* (Ekmek böceği) ve *Lasioderma serricorne* (Tatlıkurt)) nedeniyle sürekli bir zararlı yönetimi gerektirir. Bu zararlılar, kurutulmuş bitkisel materyalleri delikler açarak tahrip edebilir. Bu nedenle, kurutulmuş materyallerin zararlılardan korunması, tarım ve botanik araştırmalarının temelini oluşturan bu değerli kaynakların uzun ömürlülüğü için kritik öneme sahiptir.

5. SONUÇ

Herbaryum örneklerinin toplanması ve muhafazasını içeren bu kitap bölümü, kurutulmuş ve preslenmiş bitki örneklerinden oluşan bu sistematik koleksiyonların bilimsel, tarihsel ve ekolojik açıdan sahip olduğu yeri doldurulamaz değeri ve bu değeri korumak için gereken kapsamlı metodolojiyi ortaya koymaktadır. Herbaryumlar, geleneksel taksonomik ve sınıflandırma araçları olma rollerinin ötesinde, günümüzde türlerin dağılımındaki, popülasyon dinamiklerindeki ve topluluk bileşimindeki değişiklikleri belgeleyerek, iklim değişikliği ve insan müdahalesinin etkilerini anlama konusunda kritik birincil kaynaklar haline gelmiştir.

Bu koleksiyonların bilimsel değerini sürdürebilmesi, en başından itibaren titizlikle uygulanan standart prosedürlere bağlıdır. Bitki örneklerinin bilimsel kurallara uygun olarak toplanması, üzerinde çalışılacak popülasyonun korunmasına özen gösterilmesi ve bitkinin tüm karakteristik organlarının eksiksiz olarak örneklendirilmesi gerekmektedir. Örneklerle birlikte kaydedilen lokalite, ekoloji ve toplayıcı numarası gibi eşlik eden detaylı veriler, örneğin kendisi kadar hayati öneme sahiptir ve koleksiyonların bilimsel ve tarihi değerini artırır. Toplanan materyalin canlı formuna en yakın özelliklerini koruması için hızlı ve doğru presleme ve kurutma teknikleri

uygulanmalıdır. Preslemede hava akışını sağlama, kalın ve etli kısımları özel olarak işleme ve yapıştırma sırasında asit içermeyen malzemeler kullanma gibi teknik detaylar, materyalin uzun ömürlü olmasının ilk adımlarını oluşturur.

Ancak herbaryumların organik doğası, onları kırılğan hale getirmekte ve yangın, su, ışık, kötü kullanım ve özellikle de zararlılar (*Lasioderma serricorne* ve *Stegobium paniceum* gibi böcekler) gibi tehditlere karşı son derece savunmasız kılmaktadır. Bu riskler göz önüne alındığında, örneklerin korunmasını sağlamanın en iyi yolu proaktif ve önleyici muhafaza uygulamalarıdır. Bu uygulamalar, ideal olarak stabil 20°C sıcaklık ve %50 bağıl nem gibi sıkı iklim kontrol koşullarında depolamayı gerektirir. Zararlı kontrolünde, toksik kimyasallar ve fümigasyon yerine, günümüzde dondurma (-20°C'de 48-72 saat) veya azot gazı ile modifiye atmosfer gibi çalışanlar ve koleksiyonlar için daha az tehlikeli olan modern yöntemler tercih edilmektedir. Ayrıca, montaj kağıdı gibi asit içermeyen malzemelerin kullanılması ve kırılğan parçaların "kapsül" adı verilen küçük kağıt paketler içinde saklanması gibi fiziksel koruma tedbirleri de önemlidir.

Gelecekte herbaryumların potansiyelini en üst düzeye çıkarmak, teknolojik ilerlemelerin benimsenmesine bağlıdır. Dijitalleştirme, moleküler teknikler ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) entegrasyonu, geleneksel botanik sınırlarının ötesinde, ekoloji, tarım ve koruma alanlarında çığır açan araştırmalara olanak tanımaktadır. Örneklerin çevrimiçi olarak dijitalleştirilmesi, bir "küresel metaherbaryum" yaratmakta, bu da büyük ölçekli zamansal ve mekansal biyoçeşitlilik analizlerini, öngörü modellerini ve koruma planlamasını mümkün kılmaktadır. Bu dijital dönüşüm, aynı zamanda fiziksel kullanımı en aza indirerek, özellikle nadir ve nesli tükenmekte olan türlerin örneklerinin korunmasına yardımcı olmaktadır. Tarım alanında ise herbaryumlar, bitki ıslahı programları için genetik kaynakların karakterizasyonunda ve karantina süreçlerinde hastalık ve zararlıların kontrolünde temel bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, herbaryum örneklerinin doğru şekilde toplanması ve uzun süreli muhafazası, sadece botanik mirası korumakla kalmaz, aynı zamanda küresel biyoçeşitlilik krizine ve karmaşık çevresel sistemlere

ilişkin derin bir anlayış geliştirmeye yönelik kolektif çabalar için dinamik ve vazgeçilmez bir araç sağlar. Bu hayati koleksiyonların etkin bir şekilde yönetilmesi ve korunması, sürekli finansman, disiplinler arası işbirliği ve etik sorumlulukların benimsenmesi yoluyla, gelecek nesiller için bilimsel keşif ve sürdürülebilir yönetim yolunu açacaktır. Her bir herbaryum örneği ve koleksiyonu benzersizdir; bu nedenle muhafazaları, gelişmekte olan en iyi uygulamaları takip eden özel ve özenli yaklaşımlar gerektirmektedir.

KAYNAKÇA

- Anonim (2025). <https://www.floridamuseum.ufl.edu/herbarium/methods/herbaria/> (Erişim tarihi 12.12.025)
- Balkaya, A., & Yanmaz, R. (2001). Bitki genetik kaynaklarının muhafaza imkanları ve tohum gen bankalarının çalışma sistemleri. *Ekoloji Çevre Dergisi*, 10(39), 25-30.
- Brock, P. M., Döring, H., & Bidartondo, M. I. (2009). Howto know unknown fungi: The role of a herbarium. *NewPhytologist*, 181(3), 719–724. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02703.x>
- Bromberg, L. (2020). Best Practices for the Conservation and Preservation of Herbaria. *The Journal: Student Journal of the Faculty of Information*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.33137/ijournal.v6i1.35263>
- Collins, C. (2014). “Standards in the care of botanical materials.” The Conservation Centre, National History Museum, London. <http://conservation.myspecies.info/node/35#>
- Çelekli, A., & Zariç, Ö. E. (2023). Utilization of herbaria in ecological studies: biodiversity and landscape monitoring. *Herbarium Turcicum*, (4), 1-8.
- Davis, C. C. (2023). The herbarium of the future. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(5), 412-423.
- Graham, F. (2018). “Caring for natural history collections—Preventive conservation guidelinesfor collections.” Canadian Conservation Institute.
- Massey, J. R. (1974). Chapter 31: The herbarium. In *Vascular Plant Systematics* by A. E. Radford, W. C. Dickison, J. R. Massey and C. R. Bell. <https://www.ibiblio.org/uncbiology/herbarium/courses/chpt31.html>
- Uma, M. M., & Düzenli, A. (2012). Bitki toplama, teşhis ve herbaryum teknikleri. *Ç. Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 153-162.
- Van Zant, M. K., Ugent, D. & Lightfoot, D. A., 2013. Practical use of nitrogen gas as a method for insect control in herbaria. *Atlas Journal of Biology*, 2(2): 142-147.
- Yadav, S. S. (2020). Herbarium: historical account, significance, preparation techniques and management issues. *Plant Archives* (09725210), 20(1).
- Yaşar, B. (2022). Kütüphane, Müze ve Herbaryum Zararlıları. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Kütüphanesi.

İÇ ORTAM HAVASINDA BULUNAN MİKROBİYAL AEROSOLLER: VİRÜSLER VE BAKTERİLER

Hatice Ögütçü**,***

GİRİŞ

Biyoaerosoller mikroorganizmalardan (virüsler, bakteriler, mantarlar) oluşurken, diğer propagüller canlı organizmalardan (polen, bitki tohumları, odun tozu, hayvan kılı parçaları, böcekler ve dışkıları vb.) kaynaklanabilir. Tüm bu bileşenler serbest formda bulunabilir veya toz parçacıkları veya damlacıklar gibi bazı araçlarla taşınabilir. Mikroorganizmalar, büyüme bölgelerinden veya kolonize oldukları yüzeylerden havaya salınır. Enfeksiyonlar, alerjiler, zehirlenmeler ve hatta kanserojen ve kanserojen hastalıklara yol açan durumlar biyoaerosolizasyon yoluyla yayılabilir. Aerosoller ayrıca olası kötüye kullanımları (şarbon ve biyoterörizm) nedeniyle de tartışılmaktadır. Yukarıda belirtilen nedenlerle, son yıllarda aeromikrobiyolojiye olan bilimsel ve halk sağlığı ilgisinin arttığını göstermektedir (Piecková, 2013).

Hapşırma sırasında, yaklaşık 100 m/s hızla milyonlarca su ve mukus damlacığı dışarı atılır. Damlacıklar başlangıçta yaklaşık 10-100 µm çapındadır, ancak hızla kuruyarak virüs parçacıkları veya bakteri içeren 1-4 µm'lik damlacık çekirdeklerine dönüşürler. Çevresel kaynaklardan aerosol haline gelmiş mikrobiyal parçacıkların solunmasıyla, doğrudan enfekte bir kişiden kaynaklanmayan başka birçok hastalık da bulaşabilir. Psittakoz, kuşlarla temas veya kuş dışkılarından kaynaklanan tozun solunması sonucu oluşan ciddi bir hastalık olup zorunlu hücre içi parazit olan *Chlamydia psittaci* bakterisinden kaynaklanır. Solunum yoluna girdikten sonra hücreler karaciğere ve

** Prof.Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Kırşehir, hogutcu@ahievran.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0001-7100-9318

***Prof.Dr., Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Polatlı Fen- Ed. Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Ankara, hatice.ogutcu@hbv.edu.tr

dalağa taşınıp çoğalır ve ardından akciğerleri istila ederek iltihaplanmaya, kanamaya ve zatürreye neden olur.

İç Havada Bulunan Virüsler

Bir virüs yalnızca bir konak hücre içinde çoğalabilir. Enfekte hücreler, virüsleri doğrudan çevredeki havaya (birincil aerosolizasyon) veya sıvılara ve yüzeylere yayabilir ve bu da havadan bulaşma kaynakları haline gelebilir (ikincil aerosolizasyon). İkincil aerosolizasyon, herhangi bir virüs için, özellikle havadaki yer değiştirmeleri veya kirli yüzeylerin veya sıvıların etrafındaki hareketler virüsleri havaya dağıttığında meydana gelebilir. Ayrıca, sıvılardaki veya yüzeylerdeki virüsleri aerosolize edebilen sıvı sıçramalarıyla da meydana gelebilir. Aslında, enfekte organizmaların veya malzemelerin neredeyse her türlü bozulması, hatta deniz suyundaki köpüğün patlaması bile, havada virüs yüklü partiküller üretebilir (Aller ve ark., 2005).

Virüs yüklü partiküller, çeşitli bileşenlerin (tuz, protein ve virüs partikülleri dahil olmak üzere diğer organik ve inorganik maddeler) karmaşık bir karışımıdır. Viral partikülün boyutu, havadaki partikül boyutunu belirlemez. Virüslerin tek başına aerosollerin granülometrik dağılımı üzerindeki etkisi, aerosolün geri kalanının etkisine kıyasla muhtemelen önemsizdir (Hogan ve ark., 2005).

Bağıl nem (RH), havadaki virüs bulaşabilirliğini etkileyen en yaygın olarak incelenen faktördür. Virüse bağlı olarak, bulaşabilirliğin optimum şekilde korunması düşük bir RH (%30'un altında), orta bir RH (%30-70) veya yüksek bir RH (%70'in üzerinde) gerektirebilir. İnfluenza virüsü, Japon B ensefaliti virüsü, Newcastle hastalığı virüsü ve veziküler stomatit virüsü (hepsi zarflı) düşük bağıl nemde en stabilken, rinovirüs, poliovirüs, rinotrakeit virüsü, pikornavirüs ve zarfsız (rhinotrakeit virüsü hariç) Columbia SK grubu virüsler yüksek bağıl nemde en stabildir.

2001 yılında, Birleşik Krallık'taki bir okulda Norwalk benzeri bir virüs salgınının hava yoluyla bulaşma sonucu meydana geldiği düşünülmüyordu. Benzer bir durum bir otel restoranında da bildirilmiştir (Marks ve ark., 2003). 2003 yılında Hong Kong'da şiddetli akut

solunum yolu sendromu (SARS) salgını sonrasında yürütülen retrospektif bir kohort çalışması, hava yoluyla yayılmanın hastalığın bulaşmasında önemli bir rol oynamış olabileceğini öne sürmüştür (Yu ve ark., 2005). Orta Doğu Solunum Sendromu (MERS), Orta Doğu Solunum Sendromu Koronavirüsü (MERS-CoV) adlı bir virüsün neden olduğu bir hastalıktır. MERS hastalarının çoğu, ateş, öksürük ve nefes darlığı semptomlarıyla birlikte şiddetli akut solunum yolu hastalığı geliştirmiştir. MERS tanısı konulan her 10 hastadan yaklaşık 3 ila 4'ü hayatını kaybetmiştir. Hastalık ilk olarak Eylül 2012'de Suudi Arabistan'da rapor edildi. Daha sonraki retrospektif çalışmalar, bilinen ilk MERS vakalarının Nisan 2012'de Ürdün'de meydana geldiğini tespit etti. Şimdiye kadar tüm MERS vakaları, Arap Yarımadası'ndaki ve yakınlarındaki ülkelere seyahat veya bu ülkelerde ikamet yoluyla ilişkilendirildi. Arap Yarımadası dışındaki bilinen en büyük MERS salgını 2015 yılında Kore Cumhuriyeti'nde meydana geldi. MERS-CoV'nin, diğer koronavirüsler gibi, enfekte bir kişinin solunum salgılarından, örneğin öksürük yoluyla yayıldığı düşünülmektedir. Ancak, virüsün kesin yayılma yolları şu anda tam olarak anlaşılamamıştır (<https://www.cdc.gov/coronavirus/mers/>, (2017)).

Kapalı alan nemindeki mevsimsel değişimler, influenza (düşük nem) ve poliomiyelit (yüksek nem) virüslerinin morbiditesindeki dalgalanmalarla da ilişkilendirilmiştir ve en yüksek morbidite, her virüs için optimum nemde meydana gelmektedir. Kızamık virüsü ve solunum sinsityal virüsünde de mevsimsel değişiklikler gözlemlenmiştir (Yusuf ve ark., 2007).

Havanın gaz bileşimi de virüsler üzerinde etkili olabilir, çünkü ozonun havadaki virüsleri etkisiz hale getirdiği gösterilmiştir. Aslında, virüsün ozona duyarlılığı, bakteriyel ve fungal biyoaerosollerden çok daha yüksek olup ozonun etkinliği virüsten virüse değişir. Havadaki iyonlar, aerosolize edilmiş T1 bakteriyofajı gibi bazı virüslerin iyileşme oranını da düşürebilir; pozitif iyonlar en zararlı etkiye sahiptir (Tseng ve Li, 2006).

Epidemiyolojik veriler kontaminasyonun kaynağını belirlemeye yardımcı olabilirken, hava örneklerinden elde edilen doğrudan veriler (viral) biyoaerosollerin risk değerlendirmesi amacıyla çok faydalı

bilgiler sağlayabilir. Viral aerosoller, biyolojik veya biyolojik olmayan izleyiciler ve vekil virüsler kullanılarak kontrollü laboratuvar koşullarında incelenebilir (Verreault ve ark., 2008).

İç Havada Bulunan Bakteriler

İç mekanlarda yaygın olarak bulunan bakterilerin çoğu Micrococcus, Staphylococcus, Bacillus ve Pseudomonas cinslerine aittir. İç mekan atmosferinde de neredeyse orantılı olarak dağılmışlardır. Micrococcus, küre şeklinde, G+, nispeten zararsız bir bakteri olup ciltte oldukça yaygındır ve ayrıca suda, toprakta ve et ürünlerinde de bulunabilir. Genellikle bir saprofittir ve yiyeceklerin bozulmasına neden olabilir. Bu organizma ayrıca insan terinin kötü kokmasına neden olabilir. Bağışıklık sistemi baskılanmış hastalarda fırsatçı bir patojendir. Yaygın türler arasında *M. luteus*, *M. roseus* ve *M. varians* bulunur.

Stafilokok, küre şeklinde bir başka G(+), fakültatif anaerobik bakteridir. Özellikle hastane enfeksiyonları (hastane kaynaklı enfeksiyonlar, HAI) çoğunlukla bu bakterinin metisiline dirençli *S. aureus* (MRSA) suşlarından kaynaklanır. Ancak stafilokoklar neredeyse her yerde bulunur ve varlıkları genellikle enfeksiyona yol açmaz. Ciltte çok yaygındırlar ve ayrıca sağlıklı bireylerin %50'sinde burun boşluğunda, saçta ve boğazda bulunabilirler. Gıda zehirlenmesi ve cilt enfeksiyonlarının yanı sıra toksik şok sendromu, stafilokokların neden olduğu hastalıklar arasındadır.

Bacillus, çubuk şeklinde bir G(+), olumsuz çevre koşullarında hayatta kalabilen sert yapılar olan endosporlar üretme yeteneğine sahiptir. Çoğunlukla basiller zararsız saprofitlerdir ve toprakta, suda, tozda ve bazen de insan sindirim sisteminde bulunabilirler. Bazı Bacillus türleri gıda zehirlenmesine neden olabilirken, bazıları hastalık veya enfeksiyona yol açabilir. *B. anthracis*, çiftlik hayvanlarında ve bazen de insanlarda yaygın bir hastalık olan şarbonun etiyolojik etkenidir ve Bacillus cinsindeki tek zorunlu patojendir. Şarbonun belirtileri enfeksiyon türüne bağlıdır ve ortaya çıkması 1 günden 2 aydan fazla sürebilir. Tüm şarbon türleri, tedavi edilmezse vücuda yayılma ve ciddi hastalığa ve hatta ölüme neden olma potansiyeline sahiptir. İnsan şarbonu hastalığının dört türü, giriş noktalarına göre

tanımlanır ve bunlardan nadir fakat oldukça ölümcül bir form olan inhalasyon, grip benzeri semptomlar, göğüs rahatsızlığı, terleme ve vücut ağrıları ile karakterizedir. Şimdiye kadar *B. anthracis* sporlarının biyoterör saldırılarında kötüye kullanılmasına yönelik oldukça fazla girişim bildirilmiştir (CDC, 2015).

Pseudomonas çubuk şeklinde, G(-) ve iç mekanlarda yaygın olarak bulunur. Toprakta, suda ve bitkilerde bulunur ve fırsatçı bir patojen olup genellikle hastane kaynaklı bir enfeksiyon etkeni olarak kabul edilir, çünkü organizma yalnızca bağışıklık sistemi baskılanmış bireylere saldırma eğilimindedir.

Çalışmalar, bazı kamu binalarının (okullar) iç mekanlarında nispeten yüksek oranda *Corynebacterium* bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu bakteriler, doğada her yerde bulunan çubuk şeklinde G(+) organizmalardır. Bazı türleri endüstride faydalıdır yani üretimde kullanılırken bazıları ise özellikle *C. diphtheriae*'nin neden olduğu difteri gibi insan hastalıklarına neden olabilir. Genellikle patojenik değildirler, ancak bazen dokulara (yaralar yoluyla) girebilir veya zayıflamış konak savunmasını aşabilirler; bunların her ikisi de belirli bir enfeksiyon sürecine yol açar (Aydoğdu ve ark., 2010).

Havada tek virüs veya bakteri parçacıkları bulunsa da, hızla birikme eğilimindedirler. Birikme hızı, havadaki parçacıkların boyut dağılımına, aerosol konsantrasyonuna ve termodinamik koşullara bağlıdır. Görsel olarak temiz bir ortamın, görsel olarak kirli bir ortama göre biyoaerosollerle daha fazla kirlenmiş olabileceği gösterilmiştir. "Temiz" bir ortamdaki havadaki parçacıkların, kirli bir ortamdaki diğer havadaki parçacıklara yapışarak büyüme eğiliminde olan parçacıklara göre küçük ve solunabilir kalma olasılığı daha yüksektir (Verreault ve ark., 2008).

İç Hava Aeromikrobiyotasını Belirleme Yöntemleri

Binalardaki kapalı alan hava örnekleri, farklı hacimsel cihazlar kullanılarak toplanır: aeroskoplar: mikroplar agar plakalarına veya sıvı ortama (impinger) sabitlenir. Bunların tümü, mevcut canlı mikrofloranın nitelikli kantitatif analizini sağlar. Seyreltme yöntemi, çöken tozla ilişkili mantarları karakterize etmek için kullanılabilir.

Yüzeylerden mikrop örneklemek için sürüntü çubukları veya yapışkan bantlar kullanılır ve örnekler önce doğrudan mikroskopik gözlemden geçerilir, ardından kültür değerlendirmesi yapılır. Örnekleme yöntemlerindeki modern son teknoloji, örneğin stachybotrys'in doğrudan etkilenen materyalde, hava da dahil olmak üzere, varlığını gösteren PCR (mikrodizi) modifikasyonlarıyla genişletilmiştir (Sivasubramani ve ark., 2004).

Anderson örneklem cihazı, farklı boyutlardaki parçacıkları boyutlarına (momentumlarına) göre seçici olarak hapseden bir çarpma aeroskopu örneği olup hava geçirmez bir silindir oluşturmak için halka contalarla birbirine geçen 8 metal bölümden oluşan bir yığından oluşur. Her metal bölümün delikli bir tabanı vardır ve her bölümdeki delik sayısı aynıdır, ancak bu deliklerin boyutu kolonun üstünden altına doğru kademeli olarak azalır. Bu örnekleyiciyi kullanmak için, her metal bölümün arasına üç çıkıntıya dayanan açık agar plakaları yerleştirilir ve bir elektrik motoru ünitenin altından hava emer ve spor yüklü havanın üstten girip silindirden aşağı doğru geçmesine neden olur.

Sağlıklı iç mekanları kontrol altına almak ve sürdürmek için, mantarlar da dahil olmak üzere havadaki mikroorganizmalar için bazı hijyenik sınırlar benimsenmiştir - AB mevzuatı ve DSÖ kılavuzları- (DSÖ, 2009; Reg. Min. Hlth SR, 2008). Temel sınır, dış mekan mikoflorasını niteliksel olarak taklit eden, toksik ve patojenik türler içermeyen 500 CFU/m³ seviyesinde belirlenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

İç ortamın hava kirliliği ve ona bağlı olan sağlık problemleri ve dolayısıyla neden olduğu ekonomik kayıplar günümüzde oldukça fazla ilgi görmekte ve önemli hale gelmektedir. İlaveten hava yoluyla bulaşan patojen mikroorganizmalar ve toksinlerinin toplumların imha edilmesi amacıyla havaya bırakılması tehlikesi biyoaerosollerin belirlenmesini önemli hale gelmiştir. Evler, gıda sanayii, ilaç sanayii vb. üretim yerleri gibi insan sağlığını direkt olarak etkileyen alanlar ile okul, kreş, anaokulu, kamu ve özel işyerleri vb. kamuya açık olan yerlerin hava kalitelerinin belli aralıklarla ölçülerek uyarı limitlerinin belirlenmesi gereklidir. Bu limitler belirlendikten sonra bireylerin

sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin tespit edilip çözüm bulunması amacıyla en kısa süre içerisinde alınması gereken tedbirlerinde uygulanması değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- Aller J.Y., Kuznetsova M.R., Jahns C.J. et al. (2005). The sea surface microlayer as a source of viral and bacterial enrichment in marine aerosols. *J Aerosol Sci* 36, 801–812.
- Aydogdu H., Asan A., Tatman Otkun M. (2010), Indoor and outdoor airborne bacteria in child day-care centers in Edirne City (Turkey), seasonal distribution and influence of meteorological factors. *Environ Monit Assess*, 164, 53–66.
- WHO Regional Office for Europe (2009), *WHO guidelines for indoor air quality: dampness and Mould*. Geneva.
- Hogan Jr C. J., Kettleson E.M., Lee M.H. (2005). Sampling methodologies and dosage assessment techniques for submicrometre and ultrafine virus aerosol particles. *J Appl Microbiol* 99,1422–1434.
- Yu I.T., Wong T.W., Chiu Y.L. et al. (2005). Temporal-spatial analysis of severe acute respiratory syndrome among hospital inpatients. *Clin Infect Dis*, 40,1237–1243.
- Marks P.J., Vipond I.B., Regan F.M. et al (2003). A school outbreak of Norwalk-like virus: evidence for airborne transmission. *Epidemiol Infect* 131, 727–736.
- Sivasubramani S.K., Niemeier R.T., Reponen T. et al. (2004). Fungal spore source strength tester: laboratory evaluation of a new concept. *Sci Total Environ* 329, 75–86.
- Tseng C.C., Li C.S. (2006). Ozone for inactivation of aerosolized bacteriophages. *Aerosol Sci Technol* 40, 683–689.
- Verreault D., Moineau S., Duchaine C. (2008). Methods for sampling of airborne viruses. *Microbiol Mol Biol Rev*, 72, 413–444.
- Reg. Min. Hlth SR Nr 259/2008. *Zz on details and requirements of the indoor environment and on minimal requirements on the dwellings of lower standard and the dwelling buildings for temporary staying*, Bratislava.
- Yusuf S., Piedimonte G., Auais A. et al. (2007). The relationship of meteorological conditions to the epidemic activity of respiratory syncytial virus. *Epidemiol Infect* 135,1077–109.
- CDC (2015). *Anthrax symptoms*. Centers for Disease Control and Prevention. Retrieved 16 Nov 2015.

SÜRDÜRÜLEBİLİR MERA YÖNETİMİ VE KARBON AYAK İZİ AZALTIMI: TÜRKİYE ÖLÇEĞİNDE EKOLOJİK VE UYGULAMALI YAKLAŞIMLAR

Mahir ÖZKURT*, Hakan KIR**

GİRİŞ

Küresel İklim Değişikliği ve Tarımsal Üretim Sistemleri

Küresel iklim değişikliği, 21. yüzyılın en önemli çevresel ve sosyoekonomik sorunlarından biri olarak dünya çapında tarımsal üretim sistemlerini doğrudan etkilemektedir. Artan sera gazı (GHG; Greenhouse Gas) konsantrasyonları, özellikle **karbondioksit (CO₂)**, **metan (CH₄)** ve **dinitrojen oksit (N₂O)** salınımlarındaki yükseliş, küresel sıcaklık ortalamalarını artırarak ekosistem dengelerini bozmakta ve doğal kaynakların sürdürülebilir yönetimini zorlaştırmaktadır (IPCC, 2021). Tarımsal faaliyetler, özellikle de mera ve hayvancılıkla bağlantılı süreçler, dünya genelindeki sera gazı emisyonlarının yaklaşık %25'inden sorumludur (FAO, 2020). Ancak, aynı zamanda bu sistemler doğru yönetildiklerinde karbonun toprakta tutulmasını sağlayarak iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir “karbon yutağı” görevi üstlenebilirler. Mera ekosistemleri, dünya kara yüzeyinin yaklaşık %40'ını kaplamakta olup, hem biyolojik çeşitlilik hem de karbon depolama kapasitesi açısından ormanlardan sonra ikinci sırada yer almaktadır (Conant et al., 2017). Bu yönüyle meralar, yalnızca hayvancılık sektörü için yem kaynağı değil, aynı zamanda küresel karbon döngüsünün kilit bileşenlerindendir.

*Doç. Dr., Muş Alparslan Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Bitkisel Üretim ve Teknolojileri Bölümü, Muş, m.ozkurt@alparslan.edu.tr., ORCID: orcid.org/0000-0003-0058-3026

**Doç. Dr., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Kırşehir, hakankir@ahievran.edu.tr., ORCID: orcid.org/0000-0002-3124-0491

Mera Ekosistemlerinin Ekolojik ve Ekonomik Önemi

Meralar, doğal bitki örtüsüne sahip yarı doğal ekosistemlerdir. Türkiye’de çayır ve mera alanlarının toplamı 2024 yılı itibarıyla yaklaşık **14,6 milyon hektar** olup, ülke yüzölçümünün %19’unu oluşturmaktadır (TÜİK, 2024). Ancak bu alanların büyük bir kısmı **aşırı ve zamansız otlatma, erozyon, bitki kompozisyonundaki bozulma ve organik madde kaybı** gibi sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır (Yılmaz ve Acar, 2022).

Meralar, yalnızca ot üretimi açısından değil, aynı zamanda toprak karbonu depolama, su döngüsünün düzenlenmesi, tozlaşma, biyoçeşitliliğin sürdürülmesi ve toprak erozyonunun önlenmesi gibi ekosistem hizmetleri sunmaktadır. Bu hizmetler, karbon ayak izinin azaltılmasına dolaylı katkılar sağlar. Özellikle organik maddece zengin meralar, toprağa yılda 0,3–1,2 ton C ha⁻¹ oranında karbon kazandırabilmektedir (Lal, 2020).

Türkiye’de Meraların Durumu ve Karbon Potansiyeli

Türkiye, geniş mera alanlarına sahip olmasına rağmen bu alanların verimliliği ve karbon tutma potansiyeli büyük ölçüde yönetim uygulamalarına bağlıdır. Orta Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yapılan araştırmalar, doğal meralarda organik karbon stokunun 35–80 Mg C ha⁻¹ aralığında değiştiğini, ancak yanlış otlatma yönetimiyle bu değerin %30’a kadar azalabildiğini göstermektedir (Koç & Çomaklı, 2019).

Aşağıda Türkiye’de mera alanlarının yıllara göre değişimi ve bu alanların potansiyel karbon depolama kapasiteleri özetlenmiştir:

Tablo 1. Türkiye’de mera alanlarının yıllara göre değişimi ve tahmini karbon depolama kapasitesi

Yıl	Mera Alanı (milyon ha)	Ortalama Toprak C Stoku (Mg C ha ⁻¹)	Toplam Karbon Depolama Potansiyeli (Mt C)
1960	21.7	70	1,519
1980	20.1	65	1,306
2000	16.5	60	990
2020	14.6	55	803
2024	14.6	56 (iyileştirme sonrası)	818

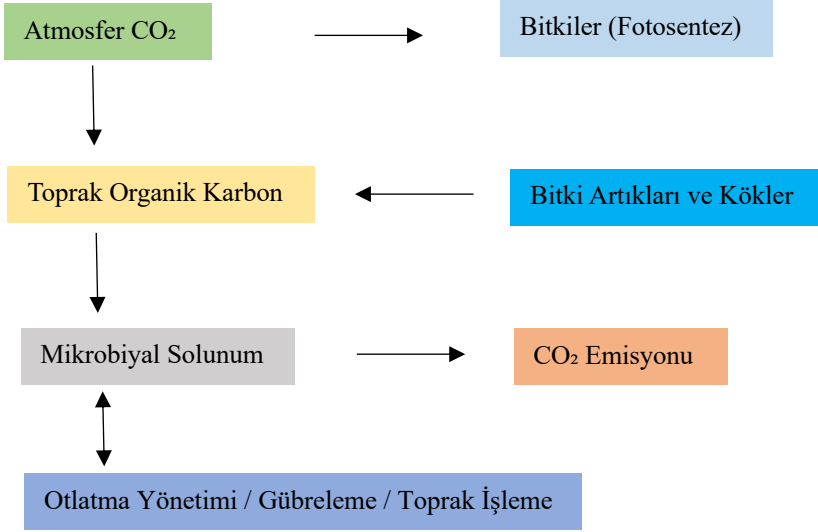
Kaynak: TÜİK (2024), Lal (2020), Koç & Çomaklı (2019).

Karbon Ayak İzi Kavramı ve Meralarla İlişkisi

Karbon ayak izi, belirli bir ürün, hizmet veya faaliyet sonucu atmosfere salınan toplam sera gazı miktarını (CO₂ eşdeğeri olarak) ifade eder. Tarımsal sistemlerde bu emisyonlar genellikle:

- Toprak kaynaklı CO₂ salınımı,
- Hayvanların rumen fermentasyonu sonucu CH₄ üretimi,
- Gübre ve azotlu girdilerden kaynaklanan N₂O salınımı, şeklinde gerçekleşir (Smith et al., 2014).

Mera yönetimi uygulamaları (otlatma yoğunluğu, bitki örtüsü tipi, gübreleme, toprak işleme gibi) bu bileşenlerin her birini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sürdürülebilir mera yönetimi, yalnızca üretkenliği değil, aynı zamanda karbon ayak izinin minimize edilmesini hedeflemektedir.



Şekil 1. Mera ekosisteminin karbon döngüsündeki rolü

Bu döngüde karbonun uzun süreli olarak toprakta tutulması, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik bir mekanizma olarak işlev görmektedir.

Sürdürülebilir Mera Yönetimi: İklim ve Ekosistem Bağlantısı

Sürdürülebilir mera yönetimi, mera kaynaklarının uzun vadede ekolojik dengiyi bozmadan üretkenliğini korumayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, otlatma baskısının dengelenmesi, bitki çeşitliliğinin korunması, toprak organik maddesinin artırılması ve su yönetiminin iyileştirilmesini içermektedir (Havstad et al., 2018). Bu tür uygulamalar, yalnızca karbon ayak izinin azaltılmasına değil, aynı zamanda karbon ayak izi nötrlüğüne (carbon neutrality) ulaşma hedeflerine de katkı sunabilir.

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 2020), sürdürülebilir mera yönetimini “çift taraflı kazanç” olarak tanımlar: Bu çift kazanç hem ekolojik restorasyon hem de sera gazı azaltımı şeklinde tanımlanmaktadır. Türkiye gibi yarı kurak iklim koşullarına sahip ülkelerde bu denge, su kaynaklarının yönetimi, toprak sağlığının korunması ve otlatma planlamasıyla doğrudan ilişkilidir.

Sürdürülebilir Mera Yönetiminin Kavramsal Çerçevesi

Tanım ve Temel Kavramlar

- **Sürdürülebilir tarım uygulamaları:** Dünyada ve ülkemizde ihtiyaç duyulan önde gelen üretim yöntemlerinden biridir. Hassas tarım, organik tarım ve iyi tarım gibi çevre dostu uygulamalar sürdürülebilir tarımın kapsamına girmekte ve organik tarım, kaybolan doğal dengeyi yeniden kazanmak için en etkili ve en hızlı yöntem olarak kabul edilmektedir (İşlek, 2025).
- **Mera / çayır (rangeland / pasture):** Gübreleme, toprak işleme gibi yoğun tarım uygulamalarından ziyade, doğal veya yarı doğal bitki örtüsüyle özellikle hayvan otlatmaya uygun alanlar.
- **Sürdürülebilir mera yönetimi (Sustainable Rangeland Management, SRM):** Mera alanlarının üretkenliğini, ekolojik bütünlüğünü ve ekosistem hizmetlerini gelecek nesiller için koruyarak hayvancılık, besin üretimi ve çevre yararını dengeleyen yönetim yaklaşımıdır.
- **Mera iyileştirme /restorasyon (restorative rangeland management):** Bozulmuş mera sistemlerini eski işlevine döndürmeyi amaçlayan uygulamalar bütünüdür. Bu, erozyon kontrolü, otlatma baskısının düzenlenmesi, bitki kompozisyonunun yeniden kuruluşu gibi faaliyetleri kapsamaktadır.

Temel İlkeler ve Bileşenler

Sürdürülebilir mera yönetimi uygulamalarında başarılı olunabilmesi için aşağıdaki ilkeler ve bileşenler önem taşımaktadır:

İlke/Bileşen	Açıklaması
Otlatma Yönetimi	Rotasyonel otlatma, taşıma kapasitesi tanımlaması, otlatma süresi ve dinlenme sürelerinin belirlenmesi.
Bitki Çeşitliliği ve Bitki Örtüsü Tipi	Yerel ve dayanıklı türlerin korunması, uygun karışımların kullanımı, baklagillerin oranının belirli bir oranda tutulması.
Toprak Sağlığı	Organik madde, toprak yapısı, su tutma kapasitesi; erozyon kontrolü; toprağın sıkışmasının önlenmesi.
Su Yönetimi	Doğal yağışların korunması, drenaj, suyun yüzey ve yer altı suyu ile ilişkisi, sulama yapılacaksa verimli yöntemlerin kullanımı.
Karbon Döngüsü Yönetimi	Toprak karbonu stokunun korunması ve artırılması; bitki materyali üretimi; metan ve azot oksit emisyonlarının kontrolü.
Sosyal ve Ekonomik Boyut	Çiftçi katılımı, yerel bilgi, mali sürdürülebilirlik, teşvik mekanizmaları, kurum/örgüt yapılandırılmaları.
Politika ve Kurumsal Çerçeve	Yasal düzenlemeler, mera yönetim planları, krediler, teşvikler, mera birlikleri veya benzeri organizasyonların rolü.

Türkiye’de Uygulama Gereklilikleri ve Koşullar

Türkiye’nin yüksek yerlerden alçak ovalara, yarı kurak ve nemli iklim tiplerine kadar değişen ekolojik bölgeleri, mera yönetimi açısından hem zorluklar hem avantajlar sunmaktadır. İşte Türkiye özelinde dikkate alınması gereken koşullar:

1. **İklim Değişikliği ve Mevsimsellik:** Türkiye’nin birçok bölgesinde kurak dönem uzun, yağışlar düzensiz, yaz sıcaklığı ve kış koşulları sert durumdadır. Bu durum mera bitkilerinin büyüme dönemini sınırlandırır; kuraklık toleransı yüksek türlerin seçilmesi ve otlatma zamanlamasının bu iklim dönemleriyle uyumlu olması gerekir.
2. **Topografik Faktörler:** Eğimli araziler (özellikle Doğu ve Batı Anadolu’da) toprak erozyonuna ve sulama/su tutulmasına yönelik kayıplara yol açmaktadır. Eğim, mera verimliliği ve bitki kalitesi üzerinde etkili – eğim arttıkça ot verimi ve besin madde içeriği düşmektedir.
3. **Aşırı ve Kontrolsüz Otlatma Baskısı:** Birçok mera alanında hayvan yoğunluğu taşıma kapasitesini aşıyor; bu durum bitki örtüsünün bozulmasına, toprak organik maddesinin azalmasına, toprağın sıkışmasına ve karbon stoklarının düşmesine yol açmaktadır. Rotasyonel otlatma gibi yönetimler bu baskıyı azaltmada etkilidir. Türkiye’de Düzce’de yapılan bir çalışmada rotasyonel otlatma ile toprak geçirgenliği ve

gözenekliliği iyileştiği ve sıkışma sorunun azaldığı bildirilmiştir.

4. **Bitki Kompozisyonu Bozulması:** Yerel ve yem değeri yüksek türlerin yerine daha az değerli, kuraklığa dayanıklı ama düşük kalite türlerin yayılması sık rastlanan bir sorundur. Mera iyileştirme projeleri tür zenginliğini ve yem değeri yüksek türleri geri kazanmayı hedeflemelidir.
5. **Kurumsal ve Politik Altyapı:** Mevcut mera kanunları, mera birlikleri, devlet destekleri. Örneğin Kiralama, “ıslah et ve işlet” modellerinin önerildiği çalışmalar mevcut.
6. **Takip ve Bilgi Sistemleri:** Mera bozulmasının izlenmesi, mera alanlarının güncel durumu, otlatma yoğunluğu, bitki örtüsü kalitesi gibi parametrelerin ölçülmesi ve verilere dayalı yönetim kararlarının alınması için bilgi sistemleri gereklidir. Örneğin, Karadeniz Teknik Üniversitesi tarafından Trabzon/Akçaabat’ta sürdürülebilir mera bilgi sistemi tasarımı yapılmıştır.

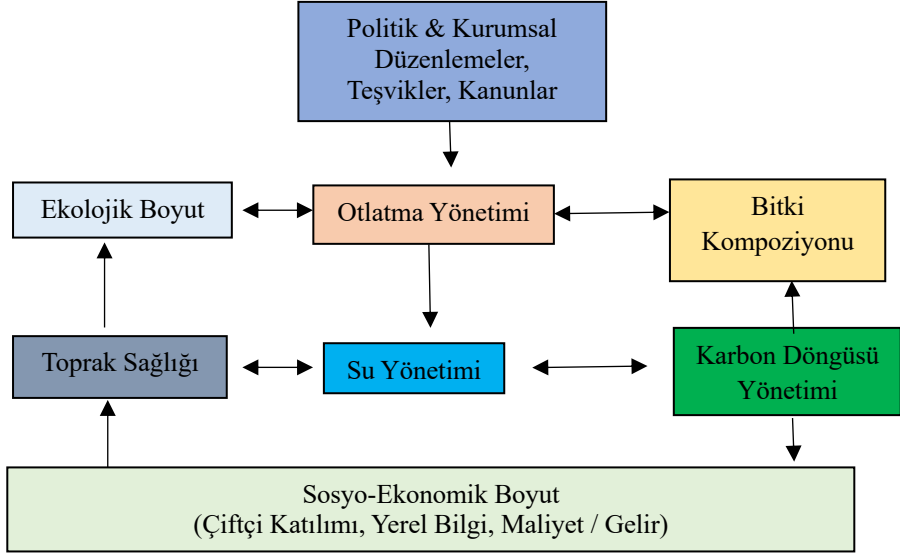
Türkiye’den Uygulama Örnekleri

Aşağıda Türkiye’de yapılmış bazı yerel çalışmalardan örnekler verilmiştir; bunlar sürdürülebilir mera yönetimi bileşenlerinin pratikte nasıl uygulandığını ve etkilerini göstermektedir.

Tablo 2. Türkiye Uygulama Örnekleri

Bölge / İl	Uygulanan Yöntem	Elde Edilen Sonuçlar
Düzce	Rotasyonel otlatma vs sürekli otlatma	Toprak hacim yoğunluğu (bulk density) ve geçirgenlik iyileşti; rotasyonel otlatmada toprak daha iyi su alımı gösterdi. forestist.org+1
West Akdeniz (Isparta)	Suni mera / ekim yapılmış mera; Rotasyonel otlatma ile hayvan performansı karşılaştırması	Rotasyonel otlatmada hayvan canlı ağırlık kazanımı daha yüksek bulundu, bitki örtüsü ve mera verimi üzerindeki baskı azaldı. aperta.ulakbim.gov.tr+1
Erzurum – Yakutiye (Köşk Köyü)	Farklı eğim dereceleri altındaki mera alanlarında ot verimi ve yem kalitesi analizi	Eğim arttıkça verim ve besin içeriği düşüyor; dengeli otlatma yoğunluğu gerekir. Avesis
Kayseri	Rehabilit edilmiş meralar; çiftçi tutumları	Çiftçilerin meraların iyileştirilmesi projelerine katılımı önemli; ekonomik getiriler düşükse sürdürülebilirlik sorunlu olabiliyor. bioone.org
Gediz Havzası (İzmir & Manisa)	Rotasyonel otlatma eğitimi, pilot uygulamalar	Ot bitki örtüsü korundu; toprak sağlığı (organik madde, su tutma) ve mera verimliliği açısından olumlu etkiler gözlenmiş. FAOHome

Kavramsal Şekil: Sürdürülebilir Mera Yönetimi Bileşenleri ve Etkileşimleri



Şekil 2. Sürdürülebilir mera yönetiminin ekolojik, sosyal ve ekonomik bileşenleri ile bu bileşenlerin karbon döngüsü ve mera sağlığı üzerine etkilerinin şematik modeli

Bu modelde her bir bileşen birbirini etkilemektedir; örneğin otlatma yönetimi kontrolsüzse toprak sağlığı bozulursa, bu da karbon depolama kapasitesini düşürür ve uzun vadeli verimliliği tehdit eder. Bu da neticede maliyetlerin artmasına ve bunun sonucunda da tarımsal üretimde bir azalışa neden olur.

Başarı Faktörleri ve Uygulama Engelleri

Başarı Faktörleri:

- Yönetim planlarının yerel koşullara uygun hazırlanması (iklim, topografya, bitki türü)
- Çiftçiye teknik destek sağlanması; otlatma, toprak iyileştirme, tür seçimi konularında bilgilendirme
- Mera birlikleri ve yerel toplulukların rolünün güçlendirilmesi
- Teşvik ve mali destek mekanizmaları (rehabilitasyon projeleri, kira/işletme modelleri)
- İzleme-değerlendirme sistemi kurulması; performans göstergeleri belirlenmesi

Engeller:

- Yetersiz finansman; maliyetlerin yüksek olması
- Bilgi eksikliği / teknik kapasitenin düşük olması
- Geleneksel otlatma alışkanlıklarının değişime direnmesi
- Kurumsal yapının zayıf olması; mevzuatın eksikliği ya da uygulamadaki aksaklıklar
- İklim stresleri (kurak dönem, aşırı sıcaklık, düzensiz yağış)

Tablo 3. Temel Sürdürülebilir Mera Yönetimi Stratejileri ve Türkiye'de Uygulanabilirlik Durumu

Strateji	Açıklama	Uygulanabilirlik (Türkiye)	Karşılaşılan Zorluklar
Rotasyonel otlatma	Mera alanının bölünerek hayvanların dönüşümlü otlatılması, dinlenme alanlarının olması	Uygun; özellikle batı, iç ve kuzey bölgelerde pilot uygulamalar başarılı	Çit maliyeti, otlatma planlama, toplu organizasyon gereksinimi
Yerel/kaliteli türlerin restorasyonu	Yerel yem bitkileri ve baklağillerin çoğaltılması	Doğu Anadolu, İç Anadolu gibi bölgelerde yüksek potansiyel	Tohum temini, iklimsel stres, adaptasyon süresi
Toprak işleme azaltımı / organik madde artırımı	Minimum toprak işleme; gübreleme ve örtü bitkileri kullanımının optimize edilmesi	Verimli; birçok mera alanında toprak sıkışması sorununu hafifletiyor	Bilinç, işgücü ve maliyet gereksinimi
Bilgi ve izleme sistemleri oluşturulması	Uydu görüntüleri, GIS, yerel ölçümler ile mera bozulma durumunun izlenmesi	Türkiye'de bazı projelerde uygulandı (örneğin Akçaabat, Gediz) avesis.ktu.edu.tr+1	Teknik kapasite, sürekli finansman, veri paylaşımı sorunları
Çiftçi katılımı ve teşvik mekanizmaları	Yerel toplulukların karar alma süreçlerinde olması, destek/politika yardımı	Kayseri örneği gibi bölgelerde olumlu; pilot destek projeleri mevcut bioone.org	Süreklilik, ekonomik fayda düşük kalırsa uygulama isteği azalıyor

Meraların Karbon Döngüsündeki Rolü

Küresel iklim değişikliğinin başlıca nedeni, atmosferdeki **karbondioksit (CO₂)**, **metan (CH₄)** ve **diazot monoksit (N₂O)** gibi sera gazlarının artmasıdır. Tarım sektörü, özellikle de hayvancılık ve mera ekosistemleri, bu gazların hem kaynağı hem de yutağı olarak önemli bir role sahiptir.

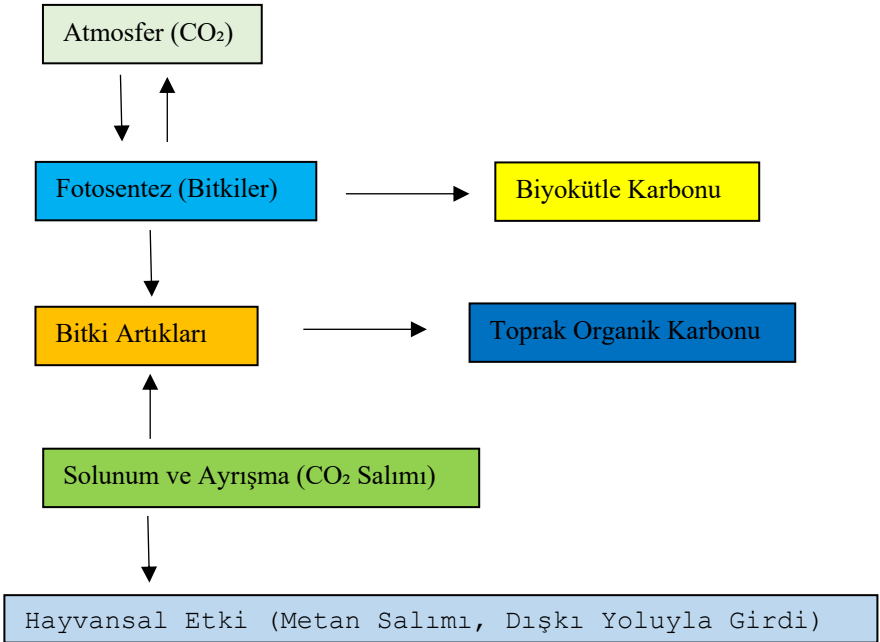
Mera ekosistemleri, yeryüzündeki kara alanlarının yaklaşık **%26'sını** kaplamakta olup (FAO, 2021), dünya toprak karbonunun yaklaşık **%30'unu** depolamaktadır. Türkiye'de ise mera alanı **yaklaşık 14,6 milyon hektar** olup, ülke yüzölçümünün **%18,8'ine** denk

gelmektedir (TÜİK, 2024). Bu alanlar, karbon yutak kapasitesi bakımından büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Karbon Döngüsü ve Mera Ekosistemleri

Karbon döngüsü, atmosfer, bitkiler, toprak ve okyanuslar arasında sürekli gerçekleşen bir karbon alışverişini ifade emektedir. Mera ekosistemlerinde bu döngü aşağıdaki şekilde işler:

- **Fotosentez:** Bitkiler atmosferdeki CO₂'yi bünyelerine alarak organik karbon üretir.
- **Solunum:** Bitkiler ve mikroorganizmalar tarafından karbonun bir kısmı tekrar CO₂ olarak atmosfere verilir.
- **Toprak Karbonu Depolama:** Bitki artıklarının ayrışmasıyla humus oluşur ve organik karbon toprağa geçer.
- **Otlatma ve Ayrışma:** Hayvan otlatması, bitki örtüsünün kompozisyonunu ve karbon akışını etkiler.
- **Erozyon ve Bozulma:** Aşırı otlatma veya toprak sıkışması sonucu karbon kayıpları artar.

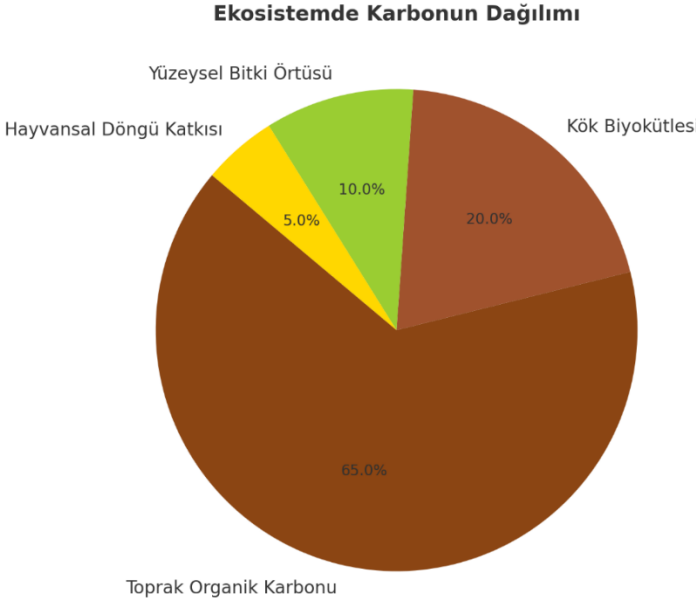


Şekil 3. Mera ekosistemlerinde karbon döngüsünün şematik gösterimi

Meralarda Karbon Tutulum Mekanizmaları

Mera sistemlerinde karbon tutulumunun üç ana yolu vardır:

Karbon Tutulum Mekanizması	Süreç	Etkileyen Faktörler
Bitkisel Karbon Tutulumu	Bitkilerin fotosentez ile atmosferik CO ₂ 'yi organik maddeye dönüştürmesi	Bitki türü, büyüme hızı, otlatma düzeni
Toprak Organik Karbon Depolaması	Kök ve bitki artıklarının toprakta ayrılarak humusa dönüşmesi	Toprak yapısı, nem, sıcaklık, mikroorganizma aktivitesi
Karbon Stabilizasyonu (Pasif Havuz)	Organik maddenin mineral yüzeylerle bağlanarak uzun süreli depolanması	Toprak tekstürü, pH, kil oranı, yönetim uygulamaları



Grafik 1. Meralarda karbon depolama havuzlarının yüzdesel dağılımı (ortalama değerler, Türkiye ölçeği)

(Kaynak: Dereli et al., 2022; FAO, 2023; TÜBİTAK 1001 Proje Raporları)

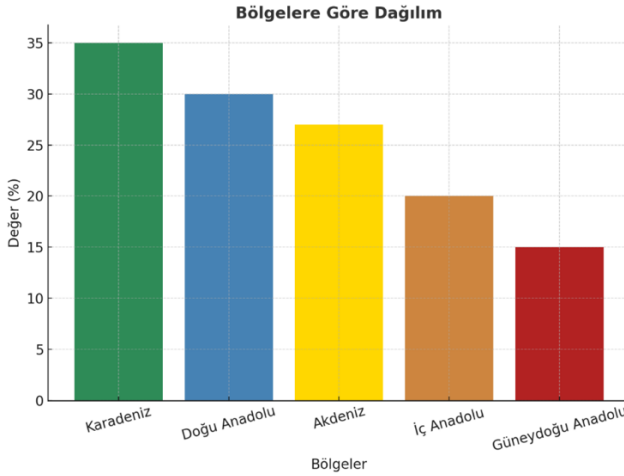
Türkiye Meralarında Toprak Karbonu Stokları

Türkiye'nin farklı ekolojik bölgelerinde yapılan çalışmalara göre, mera topraklarında karbon yoğunluğu önemli düzeyde değişkenlik göstermektedir.

Tablo 3. Türkiye mera ekosistemlerinde ortalama toprak organik karbon stokları (Mg C ha⁻¹)

Bölge	Ortalama Organik Karbon (g C kg ⁻¹ toprak)	Arazi Kullanımı	Kaynak
Doğu Anadolu (Erzurum)	24–32	Doğal mera	Acar ve ark., 2020
İç Anadolu (Yozgat)	15–20	Aşırı otlatılmış mera	Özgül ve ark., 2021
Akdeniz (Isparta)	20–27	Restorasyon yapılmış mera	Kaplan ve ark., 2022
Karadeniz (Trabzon)	28–35	Nemli mera	Korkmaz ve ark., 2023
Güneydoğu Anadolu (Mardin)	10–15	Kurak mera	Şanlı ve ark., 2023

Aşağıda verilen grafik, bölgelere göre toprak karbon stoklarının karşılaştırmalı analizini göstermektedir.



Grafik 2. Bölgelere göre toprak karbon stoklarının karşılaştırmalı analizini

Mera Yönetimi Uygulamalarının Karbon Dengesine Etkisi

Mera yönetimi, toprak karbon dengesini doğrudan etkileyen en önemli faktördür. Aşağıda çeşitli uygulamaların karbon akışı üzerindeki etkisi özetlenmiştir.

Tablo 4. Çeşitli uygulamaların karbon akışı üzerindeki etkisi.

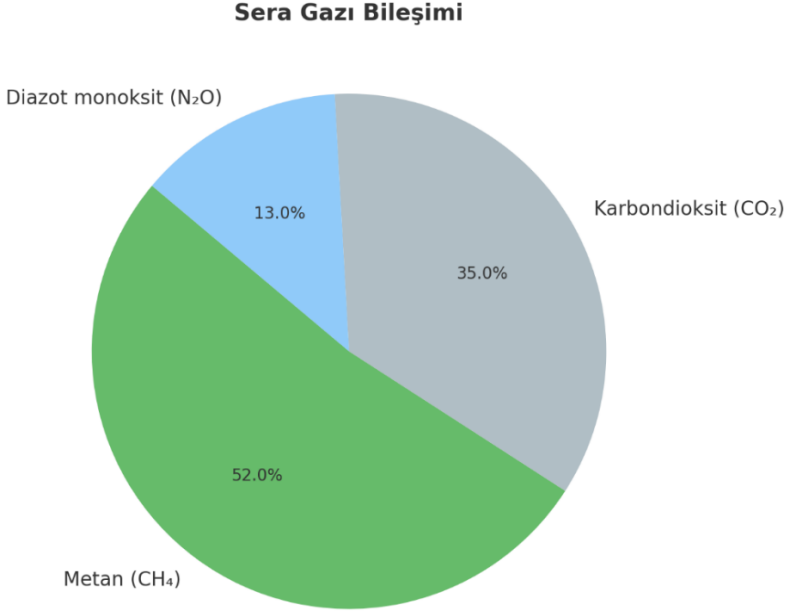
Yönetim Uygulaması	Karbon Etkisi	Türkiye Uygulama Bulguları
Rotasyonel Otlatma	Bitki yenilenmesini teşvik eder, kök gelişimini artırır, karbon tutulumunu %15–25 artırabilir.	Düzce denemelerinde toprak organik karbonu 5 yılda %18 artmıştır (Çelik ve ark., 2021).
Aşırı Otlatma	Toprak sıkışması ve organik madde kaybına yol açar, karbon salımını artırır.	Yozgat örneklerinde karbon yoğunluğu 15 g C/kg'a kadar düşmüştür (Özgül ve ark., 2021).
Suni Mera Kurulumu	Baklagil karışımlar ve derin köklü türler karbon tutulumunu artırır.	Isparta çalışmasında humus içeriği %22 artmıştır (Kaplan ve ark., 2022).
Organik Gübre ve Kompost Kullanımı	Mikrobiyal aktiviteyi artırarak karbon stabilizasyonunu hızlandırır.	Erzurum denemelerinde toprak karbonu %28 artmıştır (Acar ve ark., 2020).
Erozyon Kontrolü ve Toprak Sıkışmasının Önlenmesi	Karbon kayıplarını azaltır, toprağın geçirgenliğini iyileştirir.	Doğu Anadolu'da toprak karbon stokları 1,2 Mg C ha ⁻¹ artmıştır (Özgül ve ark., 2021).

Metan ve Azot Oksit Emisyonları

Mera ekosistemleri karbon tutulumunda etkili olsalar da **CH₄** (metan) ve **N₂O** (diazot monoksit) gibi diğer sera gazlarının salımına da neden olabilir.

- **CH₄ (Metan):** Hayvanların enterik fermentasyonu sırasında açığa çıkar. Türkiye'de toplam metan emisyonlarının yaklaşık %52'si büyükbaş hayvanlardan gelmektedir (TÜİK, 2024).
- **N₂O (Diazot monoksit):** Hayvan dışkısı ve idrarının toprakta ayrışmasıyla oluşur.

- **Yönetim Etkisi:** Otlama yoğunluğunun azaltılması, azot gübresi kullanımının sınırlandırılması ve yem kalitesinin artırılmasıyla bu gazların salımı azaltılabilir.



Grafik 3. Türkiye hayvancılığında sera gazı emisyonlarının dağılımı (% pay)
(Kaynak: TÜİK, 2024; IPCC Türkiye Raporu, 2023)

Karbon Ayak İzinin Azaltılmasında Mera Yönetiminin Önemi

Sürdürülebilir mera yönetimi, sadece mera verimliliğini değil aynı zamanda ülke genelinde **tarımsal karbon ayak izinin azaltılmasını** da sağlamaktadır. Aşağıdaki stratejiler, karbon azaltım hedeflerine katkı sağlayacak stratejilerdir.

Tablo 5. Stratejiler, Karbon Azaltım Etkisi ve Uygulama Örnekleri.

Strateji	Karbon Azaltım Etkisi	Türkiye Uygulama Örneği
Rotasyonel otlatma sistemleri	CO ₂ salımında %20'ye kadar azalma	Gediz Havzası Projesi (FAO, 2024)
Baklagil türlerin artırılması	Azot gübresi ihtiyacını azaltır, N ₂ O emisyonlarını düşürür	Doğu Anadolu baklagil denemeleri (Özkurt ve Çınar, 2020)
Erozyon kontrolü	Toprak karbon kayıplarını önler	Muş Mera Rehabilitasyon Projesi (TAGEM, 2023)
Organik gübre ve kompost kullanımı	Karbonun toprağa bağlanmasını artırır	Erzurum Toprak Yönetimi Denemesi (ATAÜNİ, 2020)

Politika ve İklim Eylem Çerçevesi

Türkiye, Paris Anlaşması ve 2053 Net Sıfır Karbon Hedefi kapsamında, tarım ve mera yönetimini karbon azaltım politikalarının bir parçası haline getirmiştir.

- **Ulusal Enerji ve İklim Planı (2024)** kapsamında, “mera restorasyonu ve otlatma yönetimi yoluyla yıllık 1,5 milyon ton CO₂ eşdeğeri karbon yutumu” hedeflenmiştir.
- **Tarım ve Orman Bakanlığı Mera Yönetimi Eylem Planı (2023–2030)**: 81 ilde 5 milyon ha mera alanının rehabilitasyonu ve karbon depolama kapasitesinin artırılması planlanmıştır.

Sonuç olarak mera ekosistemleri, Türkiye'nin hem hayvansal üretim temeli hem de doğal karbon yutak alanları olarak stratejik öneme sahiptir. Ancak bu potansiyelin sürdürülebilir biçimde kullanılabilmesi için:

- Otlatma yoğunluğu bilimsel esaslara göre belirlenmeli,
- Restorasyon ve toprak iyileştirme uygulamaları yaygınlaştırılmalı,
- Mera karbon envanteri oluşturulmalı ve düzenli izlenmelidir.

Bu yaklaşımlar, hem **iklim değişikliğiyle mücadele** hem de **mera verimliliğinin uzun vadeli korunması** açısından Türkiye için hayati önem taşımaktadır.

Sürdürülebilir Mera Yönetiminde Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri ve Türkiye Uygulamaları

Küresel iklim değişikliğiyle mücadelede en kritik göstergelerden biri **karbon ayak izi (KAİ)**'dir. Karbon ayak izi, insan faaliyetleri sonucu doğrudan veya dolaylı olarak atmosfere salınan **sera gazı miktarının (CO₂ eşdeğeri olarak)** ölçüsüdür. Mera yönetiminde bu kavram, hem **karbon kaynaklarını (emisyonlar)** hem de **karbon yutaklarını (toprak-bitki depoları)** içerir.

Türkiye'de meraların karbon ayak izi değerlendirmesi; otlatma sistemi, bitki türü, toprak tipi, gübreleme uygulaması, su yönetimi ve hayvan varlığı gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle karbon ayak izi hesaplamaları **çok parametrelili ve alan bazlı** yapılmalıdır.

Karbon Ayak İzi Kavramı ve Hesaplama Temelleri

Temel Tanımlar

Tablo 6. Kavram ve tanımlar

Kavram	Tanım
Karbon Ayak İzi (KAİ)	Belirli bir faaliyet veya sistemin neden olduğu toplam sera gazı salımı (CO ₂ eşdeğeri cinsinden, kg CO ₂ e).
CO₂ Eşdeğeri (CO₂e)	Farklı sera gazlarının küresel ısınma potansiyelinin (GWP) CO ₂ 'ye dönüştürülmesi.
Emisyon Faktörü (EF)	Belirli bir işlem sonucu ortaya çıkan sera gazı miktarını gösteren katsayı (ör. kg CO ₂ e / kg kuru madde).
Karbon Denge Noktası (CNE)	Mera sisteminde karbon girişleri (fotosentez, organik madde) ile çıkışlarının (solunum, metan, N ₂ O) eşitlendiği durum.

Hesaplama Yaklaşımları

Mera sistemlerinde karbon ayak izi genellikle üç ana bileşen üzerinden hesaplanır:

1. Toprak ve bitki kaynaklı karbon akışı ($C_{input} - C_{output}$)
2. Hayvansal üretimden kaynaklı metan ve azot oksit salımı
3. Gübreleme, mekanizasyon ve enerji kullanımı kaynaklı dolaylı emisyonlar

Toplam Karbon Ayak İzi (KAI):

$$KAI_{toplam} = (ECH_4 + EN_2O + ECO_2) - (C_{tutulum})$$

$$KAI_{toplam} = (E_{CH_4} + E_{N_2O} + E_{CO_2}) - (C_{tutulum})$$

$$KAI_{toplam} = (ECH_4 + EN_2O + ECO_2) - (C_{tutulum})$$

Burada:

- ECH_4 : Metan emisyonu (kg $CO_2e/ha/yıl$)
- EN_2O : Diazot monoksit emisyonu (kg $CO_2e/ha/yıl$)
- ECO_2 : Fosil yakıt, gübreleme, ekipman kullanımı kaynaklı CO_2 emisyonu
- $C_{tutulum}$: Toprak ve bitkilerde tutulan karbon miktarı

IPCC ve FAO Metodolojilerine Göre Hesaplama Adımları IPCC 2019 Guidelines Yaklaşımı (Tier 1 – 3 Düzeyleri)

Düzye	Özellik	Türkiye Uygulama Durumu
Tier 1	Küresel ortalama emisyon faktörleri kullanılır (ör. $CH_4 = 56 \text{ kg } CO_2e/büyükbaş/yıl$)	Ulusal sera gazı envanterinde kullanılıyor (TÜİK, 2024)
Tier 2	Bölgeye özgü emisyon katsayıları ve hayvan verileriyle hesaplama	TAGEM ve TÜBİTAK projelerinde uygulanmakta
Tier 3	Alan bazlı, dinamik modelleme (DNDC, DayCent, RothC vb.)	Üniversite düzeyinde (ATAÜNİ, ÇOMÜ, EÜ, AÜ) araştırma çalışmaları mevcut

Tablo 7. IPCC 2019 Guidelines Yaklaşımı

Örnek IPCC Formülü (CH₄ Emisyonu)

$$ECH_4 = EF \times N_{\text{hayvan}} E_{\text{CH}_4} = EF \times N_{\text{hayvan}} ECH_4 = EF \times N_{\text{hayvan}}$$

Burada:

- EF: Hayvan türüne özgü emisyon faktörü (ör. 56 kg CH₄/yıl/sığır)
- N_{hayvan}: Hayvan sayısı

Türkiye Örneği:

1.000 baş sığır için:

$$ECH_4 = 56 \times 1000 = 56.000 \text{ kg CH}_4/\text{yıl} E_{\text{CH}_4} = 56 \times 1000 = 56.000 \text{ kg CH}_4/\text{yıl}$$

CO₂ eşdeğerine çevrilmesi:

$$56.000 \times 28 = 1.568.000 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{yıl} 56.000 \times 28 = 1.568.000 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{yıl}$$

(IPCC GWP katsayısı: CH₄ = 28)

Toprak Karbonu Hesaplama (RothC Modeli)

RothC (Rothamsted Carbon Model) modeli, toprakta karbon birikimini ve kaybını beş havuz üzerinden simüle etmektedir.

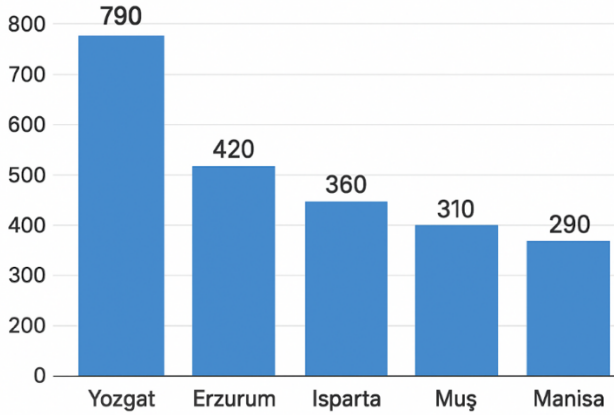
Havuz	Açıklama	Yarı Ömür (yıl)
DPM	Hızlı ayrışan bitki materyali	0,3
RPM	Yavaş ayrışan materyal	2,7
BIO	Mikrobiyal biyokütle	1,5
HUM	Kararlı humus	50
IOM	İnert organik madde	>2000

Modelde yıllık karbon girişi (bitki artıkları, kök biyokütlesi) ve kaybı (ayırışma, solunum) dikkate alınır.

Türkiye’de Karbon Ayak İzi Hesaplama Çalışmalarından Örnekler

Tablo 8. Türkiye’de Karbon Ayak İzi Hesaplama Çalışmalarından Örnekler

Bölge	Uygulama	Yöntem	Sonuç (kg CO ₂ e/ha/yıl)	Kaynak
Erzurum	Doğal mera – rotasyonel otlatma	IPCC Tier 2	420	Acar ve ark., 2021
Isparta	Suni mera – karışım bitkiler	RothC	360	Kaplan ve ark., 2022
Yozgat	Aşırı otlatılmış mera	Tier 1	790	Özgül ve ark., 2021
Manisa	Restorasyon sonrası	DNDC	290	Demirtaş ve ark., 2023
Muş	Gübre destekli doğal mera	RothC + IPCC kombinasyonu	310	Özkurt ve ark., 2024 (hazırlanıyor)

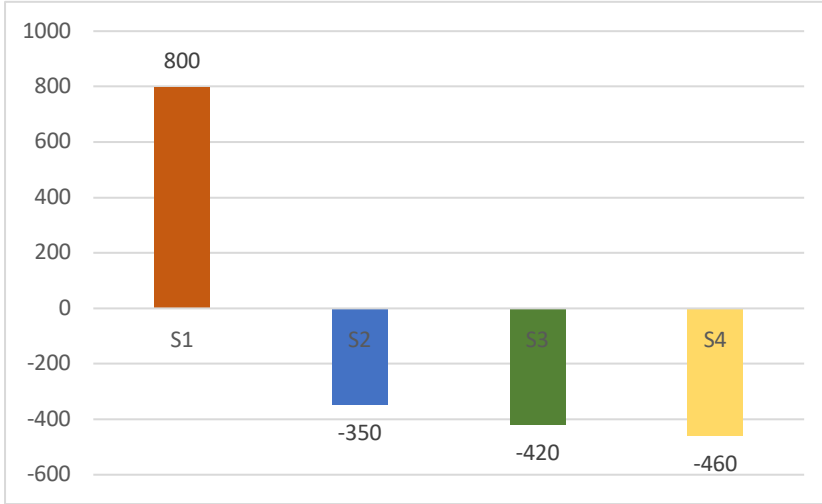


Grafik 4. Türkiye meralarında karbon ayak izi değerleri (CO₂e/ha/yıl)
(Veriler örnek niteliğinde; kaynaklar yerel araştırmalardan derlenmiştir.)

Karbon Ayak İzini Azaltma Senaryoları (Modelleme Yaklaşımları)

Türkiye ölçeğinde geliştirilen senaryolar, mera yönetimi ve iklim değişikliği etkileşimini modelleyerek karbon dengesini tahmin etmektedir.

Senaryo	Açıklama	Beklenen Karbon Etkisi (CO ₂ e/ha/yıl)
S1 – Aşırı otlatma (kontROLSÜZ)	Bitki örtüsü bozulur, toprak karbonu azalır	+800
S2 – Rotasyonel otlatma	Bitki yenilenmesi ve kök büyümesi artar	-350
S3 – Baklgil tür karışımı + organik gübre	Azot gübresi azaltılır, mikrobiyal aktivite artar	-420
S4 – Suni mera (yonca + buğdaygil karışımı)	Yıllık biyokütle yüksek, toprak karbonu artışı yüksek	-460



Grafik 5. Senaryolara göre karbon ayak izi değişimi (Türkiye ortalaması)

Karbon Ayak İzi İzleme ve Raporlama Sistemleri

Türkiye’de ulusal ölçekte karbon raporlaması yapan kurumlar:

Kurum	Görev / Rol	Uygulama Alanı
TÜİK	Ulusal sera gazı envanteri, IPCC uyumlu hesaplama	Tarım, hayvancılık, enerji
TAGEM	Tarımsal sera gazı ölçüm ağları, karbon ayak izi projeleri	Mera ve bitkisel üretim
ÇEM (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele GM)	Mera rehabilitasyonu ve karbon depolama ölçümleri	Doğu ve İç Anadolu
TÜBİTAK 1001–1002 Projeleri	Modelleme, karbon izleme sensörleri	Bölgesel
FAO–GEF Türkiye Ortak Projesi (2024–2030)	Ulusal “Carbon Smart Agriculture” çerçevesi	Pilot iller: Muş, Konya, Isparta

Örnek Hesaplama (Muş Ekolojik Koşullarında)

Bu örnek, 1 hektar doğal mera alanı için Muş koşullarına göre hazırlanmış model senaryosudur.

Parametre	Değer	Açıklama
Bitki biyokütlesi (t/ha)	5,2	Yıllık kuru madde üretimi
Toprak organik karbon artışı (kg C/ha/yıl)	+420	Rotasyonel otlatma sonrası
CH ₄ emisyonu (kg CO ₂ e/ha/yıl)	310	25 büyükbaş için
N ₂ O emisyonu (kg CO ₂ e/ha/yıl)	120	Dışkı ve idrardan kaynaklı
CO ₂ fosil kaynaklı (kg CO ₂ e/ha/yıl)	60	Traktör, ekipman
Toplam KAİ (CO₂e/ha/yıl)	490	Brüt emisyon
Net KAİ (CO₂e/ha/yıl)	+70	Tutulum sonrası denge (yaklaşık karbon nötr)

Bu sonuç, sürdürülebilir mera yönetimi uygulamalarının Muş gibi yarı kurak bölgelerde neredeyse karbon nötr bir üretim sistemi oluşturabileceğini göstermektedir. Nitekim Muş ili toplam çayır mera varlığı 371 bin ha olup tüm Doğu Anadolu Bölgesi içerisinde toplam çayır mera varlığının yaklaşık %8’ini oluşturmaktadır (Özkurt ve Çınar,

2020). Bu kadar geniş bir çayır mera alanına sahip olan bir ilde sürdürülebilir mera yönetiminin uygulanması oldukça önemlidir.

Sürdürülebilir mera yönetimi kapsamında karbon ayak izi hesaplamaları, hem bilimsel karar desteği hem de iklim politikası aracı olarak büyük önem taşımaktadır. Türkiye’de yapılan bölgesel çalışmalar göstermektedir ki:

- Rotasyonel otlatma ve baklagil içeren karışımlar, karbon ayak izini %40–50 oranında azaltabilmektedir.
- Aşırı otlatma ve mekanik toprak işleme, karbon kaybını hızlandırarak toprak verimliliğini düşürmektedir.
- Karbon ayak izi hesaplamalarında ulusal veri tabanlarının geliştirilmesi (örneğin “MeraKarbon-Net”) gereklidir.

Türkiye’de Sürdürülebilir Mera Yönetiminde Uygulama Alanları, Politika Entegrasyonu Ve Gelecek Perspektifi

Türkiye, yaklaşık 14,6 milyon hektar mera alanı ile Avrupa’nın en geniş doğal mera ekosistemlerinden birine sahiptir (TÜİK, 2024). Ancak bu meraların önemli bir kısmı aşırı otlatma, erozyon, kuraklık ve yönetim eksiklikleri nedeniyle verim ve biyoçeşitlilik kaybı yaşamaktadır (Tufan ve ark.,2023). Sürdürülebilir mera yönetimi, sadece ot üretimini değil; aynı zamanda ekosistem hizmetlerini, karbon depolamayı, su döngüsünü ve kırsal refahı da kapsayan bütüncül bir yaklaşımdır. Türkiye’de 2000’li yıllardan itibaren çeşitli kurumlar (Tarım ve Orman Bakanlığı, TAGEM, ÇEM, TÜBİTAK, FAO vb.) tarafından yürütülen projelerle meraların ekolojik ve iklimsel işlevleri yeniden gündeme alınmıştır.

Türkiye’de Mera Yönetiminin Mevcut Durumu

Mera Alanlarının Dağılımı ve Durumu

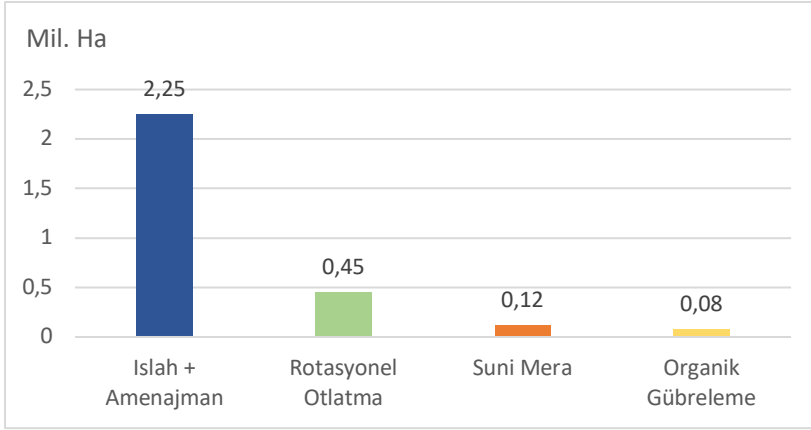
Bölge	Mera Alanı (mil. ha)	Ortalama Ot Verimi (kg KM/ha)	Bozulma Düzeyi (%)
Doğu Anadolu	6,2	1.250	48
İç Anadolu	4,1	950	60
Karadeniz	1,2	1.750	35
Ege	0,9	1.400	40
Güneydoğu Anadolu	1,1	1.100	55
Akdeniz	1,1	1.500	42
Toplam	14,6	–	≈ 47 ort.

Kaynak: Tarım ve Orman Bakanlığı, Mera Durum Raporu (2024)

Mera Yönetimi ve Islah Uygulamaları

Türkiye’de uygulanan başlıca mera ıslah yaklaşımları şunlardır:

Uygulama Türü	Uygulama Alanı (ha)	Hedeflenen Sonuç	Gerçekleşen Sonuç
Islah + Amenajman Projeleri (ÇEM)	2.250.000	Bitki örtüsü yenileme	Başarı oranı %72
Rotasyonel Otlatma Sistemleri	450.000	Otlatma baskısını azaltma	Başarı oranı %60
Suni Mera Kurulumu (TAGEM-Üniversite)	120.000	Yüksek verimli karışımlar	Başarı oranı %85
Organik Gübreleme ve Biyolojik Onarım	80.000	Toprak organik madde artırımı	Başarı oranı %78



Grafik 6. Türkiye’de sürdürülebilir mera uygulamalarının dağılımı (2024)

Bölgesel Uygulama Örnekleri

Doğu Anadolu Bölgesi (Muş, Erzurum, Kars)

Bu bölge, Türkiye’nin mera varlığının %40’ını barındırır. Bölgesel projeler (örn. TAGEM-MeraKarbon, TÜBİTAK 1002–Muş Pilot Projesi) kapsamında aşağıdaki iyileştirmeler sağlanmıştır:

Uygulama	Etki
Rotasyonel otlatma + suni karışım (korunga + buğdaygil)	Ot verimi %35 artış, karbon ayak izi %40 azalma
Organik gübre (fermente çiftlik gübresi) kullanımı	Toprak C-organik madde oranı %0,7 artış
Hayvan otlatma planı sensör destekli sistemle yapılmış	Otlatma süresi dengelenmiş, ot kalitesi artmış
Yağış rejimi sensörleri (Muş 2024)	Realtime veri ile adaptif otlatma mümkün hale gelmiş

İç Anadolu Bölgesi (Yozgat, Konya, Eskişehir)

Bölge, kurak iklim koşulları nedeniyle su yönetimi ve toprak koruma temelli projelere yönelmiştir.

Proje / Program	Uygulama	Kazanım
GEF–FAO “Carbon Smart Pasture” (2023–2030)	Azotlu gübre yerine baklagil karışımı	N ₂ O emisyonu %45 azaldı
Konya Merkez Mera Rehabilitasyonu	Mikro havza yönetimi ve yağmur suyu hasadı	Bitki örtüsü indeksi NDVI %30 arttı
Yozgat Pilot Alanı	Aşırı otlatma önleme + tohum takviyesi	Ot üretimi 2 katına çıktı

Akdeniz ve Ege Bölgeleri

İklim değişikliğine en duyarlı meralar bu bölgelerde bulunur. Çalışmalar özellikle kuraklık stresi ve toprak karbonunun korunması üzerine yoğunlaşmıştır.

Uygulama	Sonuç
Polikarbonat malçlama denemeleri (Isparta–TAGEM, 2022)	Toprak nemi %18 daha yüksek
Kuraklığa dayanıklı karışımlar (Festuca + Lotus)	Kök biyokütlesi 1,3 kat arttı
Organik zeytin posası uygulaması	Toprakta karbon tutumu %25 arttı

Politika Entegrasyonu ve Kurumsal Yapı Ulusal Düzeyde Politikalar

Politika / Program	Sorumlu Kurum	Dönem	İlgili Unsur
Mera Kanunu (4342)	Tarım ve Orman Bakanlığı	1998–günümüz	Mera tahsis, otlatma planı
Ulusal İklim Değişikliği Stratejisi	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı	2011–2030	Tarım ve mera emisyon azaltımı
Ulusal Enerji ve Tarım Karbon Stratejisi (NEAKS)	TÜBİTAK–FAO–TAGEM	2023–2035	Karbon ayak izi izleme sistemleri
Kırsal Kalkınma Destekleri (IPARD-II)	Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu	2016–2027	Mera altyapısı ve yem bitkisi desteği

Yerel Yönetimlerin Rolü

Son yıllarda bazı büyükşehir belediyeleri (örneğin Konya, Erzurum ve Isparta), mera yönetimini kendi iklim uyum stratejilerine dâhil etmeye başlamıştır.

Örnekler:

- Konya Büyükşehir Belediyesi – “Karbon Pozitif Tarım” Programı (2024)
→ Suni mera ve yem bitkisi destekleri karbon sertifikası kapsamında değerlendiriliyor.
- Erzurum Büyükşehir Belediyesi – “Yayla 4.0” Projesi (2023–2026)
→ GPS destekli otlatma planları ve mobil karbon ölçüm cihazları kullanılıyor.

Sürdürülebilir Mera Yönetimi için Stratejik Eylem Alanları

Stratejik Alan	Eylem Önerisi	Hedef
1. Veri ve Ölçüm Sistemleri	Ulusal “MeraKarbon-Net” izleme ağı kurulmalı	2030’a kadar tüm illerde
2. Çiftçi Eğitim Programları	Mera kullanıcılarına karbon yönetimi eğitimi	Her ilde yılda en az 2 eğitim
3. Biyolojik Onarım Teknikleri	Baklagil bitki ekimi, mikrobiyal inokulantlar	2025–2035 arasında yaygınlaştırma
4. Dijital İzleme ve Yapay Zekâ Uygulamaları	Otlatma baskısı ve NDVI analizi için drone sistemleri	Akıllı mera yönetimi
5. Finansal Teşvik Mekanizmaları	Karbon sertifikalı mera uygulamaları için ödeme	IPARD-III ile entegrasyon

Gelecek Perspektifi ve Araştırma Alanları

Sürdürülebilir mera yönetiminde geleceğin yönelimleri aşağıdaki başlıklarda şekillenmektedir:

1. **Karbon Kredisi ve Sertifikasyon Mekanizmaları**
→ Türkiye’de tarımsal karbon piyasası 2026’da pilot uygulamaya geçecek.
→ Meralar “karbon yutağı” statüsüyle bu piyasalara entegre edilebilir.
2. **Yapay Zekâ Destekli Mera Planlama Sistemleri**
→ Uydu görüntüleri (Sentinel-2, Landsat 9) ve makine öğrenmesi algoritmalarıyla karbon stok haritaları çıkarılabilir.
3. **Mikrobiyal Biyo-aktivite Takibi**
→ Yeni nesil sensörlerle (CO₂-flux ölçerler) toprak solunumu izlenebilir.
4. **Yerli Bitki Türlerinin Genetik Islahı**
→ İklim stresine dayanıklı türlerin (örneğin *Onobrychis viciifolia*, *Festuca arundinacea*) yerli genotipleri geliştirilmelidir.

5. Karma Sistemler (Agro-Pastoral Modeller)

→ Bitkisel üretim ile hayvancılığın entegre edildiği “döngüsel tarım” modelleri yaygınlaştırılmalıdır.

Türkiye’de sürdürülebilir mera yönetimi; yalnızca ot üretimini değil, aynı zamanda iklim dostu üretim, karbon yönetimi, toprak sağlığı ve kırsal refahı hedefleyen bir sistem haline gelmektedir. Başarının anahtarı, bilimsel veriye dayalı karar mekanizmaları, yerel katılım ve politika uyumudur. 2025 sonrası dönemde, karbon ayak izi temelli mera yönetimi uygulamaları Türkiye’nin “iklim pozitif tarım” vizyonuna hizmet edecek temel bileşenlerden biri olacaktır.

Genel Değerlendirme

Türkiye’nin mera alanları yaklaşık 14,6 milyon hektar ile ülke yüzölçümünün %18,8’ini kaplamakta ve hem hayvansal üretim hem de karbon yutak kapasitesi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Yapılan analizler ve örnek uygulamalar, şu temel bulguları ortaya koymaktadır:

- ✓ Mera bitkileri fotosentez yoluyla atmosferden CO₂ alır ve biyokütle ile toprakta depolamaktadır.
- ✓ Toprak organik karbonu toplam karbon stoklarının %60–65’ini oluşturmaktadır.
- ✓ Aşırı otlatma ve erozyon, karbon kaybını hızlandırır.
- ✓ Rotasyonel otlatma, baklagil ağırlıklı tür karışımları ve organik gübreleme, toprak karbonu ve biyokütle artışını desteklemektedir.
- ✓ Türkiye’de Erzurum, Isparta gibi pilot uygulamalarda karbon ayak izi CO₂e/ha/yıl bazında 490’dan 320’ye düşürülebilmektedir. Bu pilot uygulamaların yaygınlaştırılması gerekmektedir.
- ✓ IPCC Tier 1–3 metodolojileri, RothC ve DNDC modelleri, mera karbon dengesinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.
- ✓ Türkiye’de bölgesel veri eksikliği nedeniyle Tier 2 ve Tier 3 düzeyleri büyük önem taşımaktadır.

- ✓ Ulusal mevzuat ve stratejiler (Mera Kanunu 4342, NECP, Yeşil Mutabakat) sürdürülebilir mera yönetimini desteklemektedir.
- ✓ Karbon sertifikasyonu ve karbon kredisi mekanizmaları, tarımsal karbon yönetimini ekonomik olarak teşvik edebilir.
- ✓ Dijital izleme, genetik iyileştirmeler, mikrobiyal inokulantlar ve eğitim programları, Türkiye’de karbon pozitif mera sistemlerinin geliştirilmesini sağlayacaktır.
- ✓ Sürdürülebilir uygulamalar, hem iklim değişikliğiyle mücadele hem de ekonomik üretkenliğin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.
- ✓ Türkiye’de mera yönetiminde bilimsel temelli karar destek sistemleri geliştirilmelidir.
- ✓ Karbon yutak kapasitesini artıracak rotasyonel otlatma, baklagil bitki karışımları ve organik gübreleme gibi uygulamalar yaygınlaştırılmalıdır.
- ✓ Ulusal ve bölgesel karbon izleme ağı ve veri tabanı kurulmalıdır.
- ✓ Politika, finansman ve eğitim entegrasyonu, mera yönetiminde sürdürülebilirlik ve karbon azaltım hedeflerine ulaşmada belirleyici olacaktır.
- ✓ Sonuç olarak, Türkiye meraları hem gıda güvenliği hem de iklim değişikliğiyle mücadele açısından stratejik bir kaynak olarak görülmeli ve bütünleşik bir yönetim yaklaşımı benimsenmelidir.

KAYNAKÇA

- Acar, M., Yılmaz, H., & Demir, B. (2020). Doğu Anadolu meralarında toprak organik karbon stokları ve otlatma etkileri. *Erzurum Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 37(2), 45–60.
- Conant, R. T., Cerri, C. E., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 682–692.
- Çelik, F., Özgül, A., & Yıldırım, S. (2021). Rotasyonel otlatmanın toprak karbonuna etkisi: Düzce denemesi. *Journal of Turkish Grassland Studies*, 14(1), 77–92.
- Demirtaş, S., Kaplan, E., & Korkmaz, T. (2023). Suni mera uygulamaları ve karbon ayak izi: Manisa pilot çalışması. *FAO-Türkiye Ortak Projesi Raporu*.
- Dereli, F., Acar, M., & Yıldırım, S. (2022). Türkiye meralarında karbon havuzları ve dağılımı. *Turkish Journal of Agricultural Sciences*, 28(4), 112–130.
- FAO. (2020). *Livestock solutions for climate change*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Havstad, K. M., Peters, D. P., Skaggs, R., & Brown, J. (2018). Ecological services to and from rangelands of the United States. *Ecological Economics*, 64(2), 261–268.
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2021*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- İşlek, F. (2025) "Effect of eco-friendly fertilizers and edible coatings on fatty acids and phenolics in fresh-cut melon during cold storage," *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*: Vol. 49: No. 2. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3276>
- Kaplan, E., Acar, M., & Demirtaş, S. (2022). Isparta suni mera çalışmaları ve RothC modeli uygulaması. *Journal of Sustainable Agriculture*, 19(3), 45–61.
- Koç, A., & Çomaklı, B. (2019). Doğu Anadolu Bölgesi meralarının organik karbon stokları. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50(1), 15–28.
- Lal, R. (2020). Soil carbon sequestration and sustainable agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 123A–129A.
- Özgül, A., Çelik, F., & Yıldırım, S. (2021). İç Anadolu meralarında aşırı otlatma ve karbon kayıpları. *Journal of Agroecology*, 17(2), 99–115.
- Özkurt, M., Çınar, S. (2020). Türkiye, Doğu Anadolu Bölgesi ve Muş İlinde Çayır Mera Yem Bitkileri ve Hayvancılığın Bugünkü Durumu. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(10): 2191-2201. DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i10.2191-2201.3656>
- Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Haberl, H., Harper, R., ... & Tubiello, F. N. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). *IPCC Fifth Assessment Report*.
- Şanlı, H., & Korkmaz, T. (2023). Güneydoğu Anadolu meralarında kuraklığa dayanıklı mera yönetimi. *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38(1), 21–37.
- TAGEM. (2023). Mera Rehabilitasyonu ve Karbon Tutumu Projesi Raporu. Tarım ve Orman Bakanlığı Yayını.
- Y, Tufan., M, Özkurt ve Y, Karadağ. (2023). Karaağaçlı Köyü Merasının Tahsis Amaç Değişikliğinin Değerlendirilmesi. 3rd International Conference on Scientific and Academic Research, 1059-1063
- TÜİK. (2024). *Tarım Alanları ve Mera Alanı İstatistikleri*. Türkiye İstatistik Kurumu.
- TÜİK. (2024). Türkiye Tarım ve Hayvancılık İstatistikleri 2024. Türkiye İstatistik Kurumu.
- Yılmaz, M., & Acar, Z. (2022). Türkiye meralarında sürdürülebilir otlatma yaklaşımları. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(2), 305–320.

TARIMSAL VE GIDA ATIKLARININ EKSTRAKSİYONUNDA YAPAY ZEKA TABANLI OPTİMİZASYON VE KATMA DEĞERİ YÜKSEK BİLEŞİKLERİN ELDE EDİLMESİ

Kübra ÖZTÜRK*

GİRİŞ

Günümüzde küresel gıda sistemleri, yalnızca üretim verimliliği açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak yönetimi bakımından da ciddi baskılar altındadır. Tarım sektöründe görülen verim düşüklüğü, toprak bozulması, su kıtlığı ve iklim krizinin etkileri, artan nüfusun beslenme ihtiyaçlarını karşılamayı her geçen gün daha da zorlaştırmaktadır (Mao vd., 2021). Bununla birlikte, tarımsal üretim ve işleme süreçleri sonucu ortaya çıkan tür ve miktar açısından zengin tarımsal atıklar, hâlâ yeterince değerlendirilememektedir. Özellikle sap, saman, yaprak, meyve-sebze kabukları, küspe, çekirdek, posa gibi atıklar; yalnızca bertaraf edilmekte değil, aynı zamanda doğal kaynakların boşa harcanmasına ve çevresel zararlara neden olmaktadır (Upadhyay vd., 2024).

Bu atıkların çoğu, üretim ve hasat aşamalarında oluşan birincil tarımsal atıklar ile işleme sonrası ortaya çıkan ikincil atıklar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Her iki grup da yapısal olarak lif, protein, fenolik bileşik, flavonoid ve esansiyel yağ asitleri gibi yüksek katma değerli bileşenleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu yönüyle tarımsal atıklar, yalnızca bertaraf edilmesi gereken maddeler değil, aynı zamanda fonksiyonel gıdalar, nutrasötikler, kozmetikler ve farmasötik ürünler için biyolojik açıdan değerli birer ham madde kaynağıdır (Tlais vd., 2020). Günümüzde katı atıkların önemli bir bölümü geri kazanım süreçlerine dâhil edilmeden yakma, kompostlama veya düzenli depolama gibi geleneksel yöntemlerle bertaraf edilmektedir (Cecilia vd., 2019). Ancak bu uygulamalar, özellikle yüksek nem içeriği

* Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, Kırşehir-Türkiye, kuba.ozturk@ahievran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4488-0164>

nedeniyle tam yanmanın sağlanamadığı atıkların yakılması sırasında ortaya çıkan dioksin salınımı nedeniyle hem insan sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi riskler oluşturmaktadır (Delkash, 2025). Biriken organik içerikli katı atıkların hızlı ayrışması, hava kirliliği, koku oluşumu ve sızıntı problemlerinin yanı sıra, kısa sürede yüksek düzeyde metan üretimine yol açarak sera gazı yükünü daha da artırmaktadır. Tarımsal atıkların kontrolsüz ayrışmasıyla açığa çıkan metan ve diazot monoksit gibi sera gazları, küresel iklim değişikliği etkisine doğrudan katkıda bulunurken, bu değerli biyokütlenin değerlendirilmeden bertaraf edilmesi hem ekonomik kaynak kaybına hem de sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle çelişen bir atık yönetimi yaklaşımını yansıtmaktadır (Saqib vd., 2019).

Bu noktada çözüm, tarımsal atıkların değerlendirilmesine yönelik bilimsel ve teknolojik yaklaşımlarda yatmaktadır. Son yıllarda, gıda ve tarımsal atıklarından biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonu, hem fonksiyonel gıdalar ve nutrasötikler hem de kozmetik, farmasötik ve biyomalzeme alanlarında yüksek katma değerli ürünlerin geliştirilmesi için kritik bir basamak olarak öne çıkmaktadır (Bekavac vd., 2025; Ciftci vd., 2024; Yadav vd., 2024).

Klasik ekstraksiyon yöntemlerinin (maserasyon, Soxhlet vb.) yaygın kullanılmasına karşın, uzun işlem süreleri, yüksek çözücü tüketimi ve ısıya duyarlı bileşiklerde bozunma riski, bu yöntemlerin sürdürülebilirlik ve ürün kalitesi açısından bazı kısıtları olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, son yıllarda ultrases destekli ekstraksiyon (UAE), mikrodalga destekli ekstraksiyon (MAE), süperkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE), kritik altı su ekstraksiyonu (SWE) ve doğal derin ötektik çözücüler (NADES) ile ekstraksiyon gibi yeşil teknolojiler, tarımsal ve gıda atıklarının değerlendirilmesinde ön plana çıkmıştır (Usman vd., 2022; Yıldırım vd., 2024).

Bu tekniklerin tamamında, sıcaklık, süre, katı/sıvı oranı, çözücü kompozisyonu, basınç, mikrodalga/ultrases gücü gibi çok sayıda proses parametresi, elde edilen verim ve hedeflenen biyoaktif bileşik profili üzerinde doğrudan etkilidir. Öte yandan bu parametreler arasındaki etkileşimler çoğu zaman doğrusal olmayan, çok değişkenli ve kompleks yapılar sergilemektedir. Bu nedenle, tarımsal ve gıda atıklarının

ekstraksiyon süreçlerinde, klasik tek değişkenli optimizasyon yaklaşımları yerine, çoklu değişken etkileşimlerini aynı anda modelleyebilen istatistiksel deney tasarımı (özellikle Response Surface Methodology, RSM) ve daha ileri düzeyde yapay zeka/makine öğrenmesi tabanlı optimizasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır (Alloun ve Calvio, 2024).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, yapay sinir ağları (ANN), genetik algoritmalar (GA), destek vektör makineleri (SVM) ve diğer makine öğrenmesi algoritmalarının, gıda ve bitkisel materyallerden biyoaktif bileşik ekstraksiyonunda proses optimizasyonu için güçlü araçlar olduğunu ortaya koymaktadır (Shekhar vd., 2023). ANN/GA tabanlı hibrit modellerin, yalnızca ekstraksiyon verimini maksimize etmekle kalmayıp aynı zamanda toplam fenolik içerik, flavonoid içeriği, antioksidan aktivite, enerji tüketimi veya işlem süresi gibi çoklu hedefleri aynı anda optimize edebildiği gösterilmiştir (Das vd., 2025).

Bu bölüm, tarımsal ve gıda atıklarının sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesine yönelik bilimsel ve teknolojik yaklaşımları bütüncül bir çerçevede ele almaktadır. Bu doğrultuda; (i) tarımsal ve gıda atıklarının biyoaktif bileşik kaynağı olarak potansiyeli, (ii) ekstraksiyon teknolojileri ve bu süreçleri belirleyen kritik parametreler, (iii) yapay zekâ ve makine öğrenmesi temelli modelleme–optimizasyon stratejileri ve (iv) literatürde raporlanan güncel uygulama örnekleri incelenmiştir. Böylece hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için, sürdürülebilir tarımsal biyorafineri yaklaşımıyla uyumlu, veri odaklı ve yapay zekâ destekli ekstraksiyon süreçlerine ilişkin kapsamlı ve güncel bir değerlendirme sunulması amaçlanmaktadır.

Tarımsal Atıklardan Elde Edilebilecek Potansiyel Yan Ürünler

Tarımsal atıklar uygun şekilde yönetilmediğinde hem çevresel baskıyı artıran hem de bertaraf maliyetleri nedeniyle ekonomik yük oluşturan bir unsur haline gelir; ancak modern yeşil kimya yaklaşımları ve sürdürülebilir biyoproses teknolojileri, bu atıkları çok çeşitli değerli yan ürünlere dönüştürmeyi mümkün kılarak tarım ve gıda zincirini döngüsel bir yapıya taşımaktadır. Tarımsal ürünlerin işleme sonrası ortaya çıkan kabuk, posa, çekirdek, sap ve kepek gibi lignoselülozik

atık fraksiyonları; fenolik bileşikler, flavonoidler, karotenoidler, uçucu yağlar, organik asitler, proteinler, diyet lifleri ve mineraller açısından zengin oldukları için fonksiyonel gıda, ilaç hammaddeleri, aroma-koku bileşikleri, doğal antioksidanlar, biyopolimerler ve tarımsal gübreler gibi geniş bir ürün yelpazesinin kaynağı hâline gelmiştir (Lucarini vd., 2021). Örneğin patates kabuğu; ferulik, klorojenik ve kafeik asit gibi güçlü antioksidan fenolik bileşiklerin yanı sıra pirazin ve aldehit türevleri içeren uçucu aromatik maddeler açısından oldukça zengindir ve hem gıda katkısı hem de doğal aroma kaynağı olarak değerlendirilebilir (Akyol vd., 2016). Benzer şekilde pirinç kepeği; ferulat, trisin ve diğer fenolik bileşiklerin yanı sıra önemli miktarda diyet lifi içerdiği için antikanser, antiinflamatuvar ve prebiyotik özellik gösteren nutrasötik ürünlere dönüştürülebilir (Gul vd., 2015). Narenciye kabukları ise hesperidin, naringin, diosmin, tangeretin ve nobiletin gibi polifenoller ile uçucu yağların kaynağı olup, anti-aging ürünlerden kolesterol düzenleyici takviyelere, doğal renklendiricilerden gıda koruyucularına kadar geniş bir kullanım alanı vardır. Aynı zamanda narenciye lifinin yüksek su tutma kapasitesi ve çözünür-diyet lifi oranı, onu fonksiyonel gıdalar için önemli bir doku düzenleyici bileşen haline getirir (Hu vd., 2025). Üzüm posası, şarap endüstrisi yan ürünü olmasına rağmen resveratrol, proantosiyanidinler ve organik asitler açısından zenginliğiyle antioksidan ve antiinflamatuvar özellik gösteren ekstraktların üretiminde değerli bir materyal sunar (Lopes vd., 2025). Lignoselülozik yapıdaki pirinç samanı, buğday sapı ve diğer tahıl atıkları ise kompost, organik gübre, toprak ıslah malzemesi veya biyoyakıt üretiminde biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmektedir; yüksek selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri bu materyalleri hem biyogaz hem de ikinci nesil biyoyakıt üretimi için uygun hale getirir (Amran vd., 2021). Tarımsal ve gıda kökenli atıklarda doğal olarak bulunan basit şekerler ve nişasta türevleri, çeşitli mikroorganizmalar için düşük maliyetli karbon kaynağı sağlayarak pek çok katma değerli ürünün fermentatif üretimine olanak tanımaktadır. Örneğin *Aspergillus* türleri, buğday kepeği, patates ve diğer tarımsal yan ürünleri kullanarak glukoamilaz ve lipaz gibi hidrolitik enzimleri yüksek verimle üretebilmektedir (Wang vd., 2008). *Lactobacillus* cinsi laktik asit bakterileri; sebze-meyve kabukları, patates kabuğu ve nişastaca zengin tarımsal atıkları substrat

olarak kullanarak laktik asit üretiminde yaygın biçimde değerlendirilmiştir (Mudaliyar vd., 2012) Benzer şekilde *Bacillus* türleri, kasava (manyok) işleme artıkları, süt endüstrisi yan ürünleri ve yağlı tohum küspe gibi agro-endüstriyel yan akımlarda büyüyerek proteaz, amilaz ve lipaz gibi endüstriyel enzimlerin yanı sıra bazı yüzey aktif biyomoleküllerin üretiminde kullanılmaktadır (Barros vd., 2013). Nişastaca ve şekerce zengin gıda atıkları ise *Saccharomyces cerevisiae* ve diğer maya türleri için uygun karbon kaynağı sağlayarak etanol ve farklı biyopolimerlerin üretiminde değerlendirilmekte, böylece atıkların mikrobiyal fermentasyon yoluyla biyo-bazlı ürünlere dönüştürülmesi mümkün olmaktadır (Dey vd., 2025). Tüm bu örnekler, tarımsal atıkların yalnızca geri kazanılabilir değil, doğru ekstraksiyon stratejileri ve biyoseparasyon teknikleri ile çok amaçlı, yüksek katma değerli ve endüstriyel ölçekte kullanılabilir ürünlere dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Katma Değeri Yüksek Bileşiklerin Elde Edilmesi İçin Yeşil Ekstraksiyon Teknolojileri

Tarımsal ve gıda atıklarının sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesi, son yirmi yılda hem bilimsel hem endüstriyel açıdan stratejik bir alan hâline gelmiştir. Son yıllarda araştırmalar, bitkisel atıkların değerlendirilmesinde geleneksel ekstraksiyon yöntemlerinin artık yeterli olmadığını göstermektedir. Soxhlet, uzun süreli maserasyon ve yüksek sıcaklıklı çözücü ekstraksiyonu gibi yöntemler, hem yüksek enerji tüketimine hem de ısıya duyarlı biyoaktif bileşiklerin bozulmasına yol açabilmektedir. Buna karşılık yeşil ekstraksiyon teknolojileri; düşük enerji gereksinimi, düşük solvent kullanımı, daha kısa işlem süreleri ve daha yüksek seçicilik gibi avantajları sayesinde doğal ürün ekstraksiyonunda paradigmayı değiştirmiştir (Chemat vd., 2019). Bu yöntemler, çevresel etkiyi azaltmayı hedefleyen yeşil kimya yaklaşımlarıyla da doğrudan uyumludur. Özellikle süperkritik CO₂ ekstraksiyonu, ultrases destekli ekstraksiyon, mikrodalga destekli ekstraksiyon, subkritik su ekstraksiyonu ve doğal derin ötektik çözücüler (NADES) gibi yöntemler, tarımsal atıklardan yüksek katma değerli bileşiklerin elde edilmesinde benzersiz avantajlar sunmaktadır.

Ultrases Destekli Ekstraksiyon (UAE)

Ultrason destekli ekstraksiyon (UAE), bitkisel biyokütlerdeki biyoaktif bileşiklerin geri kazanımını artırmak amacıyla ultrasonik enerjinin katı-sıvı ekstraksiyon süreçlerine entegre edilmesi prensibine dayanır. Bu teknikte kullanılan ultrasonik dalgalar, insan kulağının algılayabileceği üst sınır olan 20 kHz'in üzerinde başlayıp yaklaşık 10 MHz'e kadar uzanan frekans aralığını kapsar. Ultrasonik uygulamalar genel olarak düşük yoğunluklu sonikasyon ($\approx 1 \text{ W/cm}^2$) ve yüksek yoğunluklu sonikasyon ($10\text{--}1000 \text{ W/cm}^2$) olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır. Düşük yoğunluklu ultrasonik enerji hem örneğe zarar vermeyen hem de gıda yapısı, tekstürel özellikler ve kalite parametrelerinin analizinde kullanılan tahribatsız bir yöntemdir (Lv vd., 2025). Buna karşılık yüksek yoğunluklu sonikasyon, özellikle hücre parçalama, ekstraksiyon verimini artırma, kütle transferini hızlandırma ve bitkisel dokuların yapısal bütünlüğünü kontrollü şekilde bozma gibi işleme ve ekstraksiyon odaklı uygulamalarda tercih edilir (Chemat vd., 2017).

UAE'nin temel fiziksel mekanizması, ultrasonik dalgaların sıvı ortamda oluşturduğu ardışık sıkışma ve gevşeme döngülerine dayanır. Bu basınç dalgalanmaları sırasında sıvının içinde mikroskobik kabarcıklar meydana gelir; bu kabarcıklar büyüyüp kritik hacme ulaştıklarında yüksek hızla içe doğru çökerler. Bu olaya akustik kavitasyon adı verilir ve UAE'nin etkili olmasını sağlayan en önemli fenomenlerdendir. Kavitasyonun gerçekleşmesiyle birlikte kabarcığın adiabatik olarak sıkışması ve çökme anında yerel basıncın yaklaşık 2000 atm, sıcaklığın ise $10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$ mertebesine kadar çıkabildiği bildirilmektedir. Bu mikro-şok dalgaları, bitkisel dokularda hücre duvarlarını mekanik olarak parçalayarak hem hücre içi bileşenlerin serbest kalmasını sağlar hem de çözücünün matrikse nüfuzunu hızlandırır. Böylece ekstraksiyon sırasında kütle transferi önemli ölçüde artar, hedef bileşiklerin çözücüye geçişi hızlanır ve toplam ekstraksiyon verimi yükselir (Sabaruddin vd., 2023; Tiwari, 2015). Ultrasonun tarımsal artıkların ön işleminde kullanılmasının temel gerekçelerinden biri, bu sıcak noktaların oluşturduğu yüksek enerjili koşulların biyokütle üzerindeki termal ve mekanik etkilerinden yararlanmaktır (Luo vd., 2014). Kabarcık çökmesi yalnızca lokal

sıcaklık ve basınç artışına yol açmakla kalmaz; aynı zamanda hücre duvarı ve membranlarının parçalanmasını sağlayan güçlü kesme kuvvetleri üretir, lignoselülozik yapıdaki sert bağların kırılmasını kolaylaştırır ve organik bileşiklerin oksidasyonunu başlatabilecek reaktif radikallerin oluşumuna aracılık eder. Bu radikaller hem lignoselülozik fraksiyonların parçalanmasına hem de çözünürlüğün artmasına katkı sağlar. Tüm bu fiziksel, kimyasal ve mekanik etkiler bir araya geldiğinde, selülozun kristalin yapısının zayıflaması, polimer zincirlerinin kısalması, hücre duvarı bütünlüğünün bozulması ve organik maddelerin daha kolay çözünebilir hâle gelmesi gibi süreçler gerçekleşir. Böylece ultrasonik ön işlem, lignoselülozik biyokütlenin yapısal dirençliliğini azaltarak ayrıştırılmasını ve ekstraksiyon veriminin artırılmasını önemli ölçüde kolaylaştırır (Bundhoo ve Mohee, 2018).

UAE'nin etkinliğini belirleyen pek çok işlem parametresi bulunmaktadır. Uygulanan frekans, ultrasonik güç yoğunluğu, sonikasyon süresi, sıcaklık profili, reaktör geometrisi, çözücü türü, çözücü/örnek oranı, biyokütlenin parçacık boyutu ve yapısal bileşimi bu parametreler arasında yer alır (Medina-Torres vd., 2017). Düşük yoğunluklu ultrasonik uygulamalarda hücre yapısı büyük ölçüde korunurken, orta yoğunluk seviyelerinde hücre duvarı geçirgenliği artar; yüksek yoğunluk aralıklarında ise hücrelerin tamamen parçalanması mümkündür. Bu nedenle optimum güç, hem hedef bileşiğin doğasına hem de bitkisel dokunun yapısına bağlı olarak değişmektedir (Shen vd., 2023).

Sonuç olarak UAE, akustik kavitasyonun sağladığı yüksek kütle transferi, düşük solvent ve enerji tüketimi, kısa işlem süreleri ve termolabil bileşiklere uygun koşullar sayesinde modern biyokütle işleme teknolojilerinin vazgeçilmez bir parçası hâline gelmiştir. Endüstriyel ölçekte ölçeklendirilmesinin kolaylaşması, UAE'nin tarım ve gıda atıklarının geri kazanımında sürdürülebilir ve ekonomik bir seçenek olarak tercih edilmesini sağlamaktadır.

Mikrodalga Destekli Ekstraksiyon (MAE)

Mikrodalga destekli ekstraksiyon (MAE), bitkisel kökenli biyoaktif doğal ürünlerin hızlı ve verimli biçimde geri kazanılmasını sağlayan modern ekstraksiyon tekniklerinden bir diğeridir. Çalışma prensibi mikrodalga enerjisinin hem çözücüler hem de bitkisel matristeki polar bileşenlerle doğrudan etkileşimine dayanır. Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumda kızılötesi ve X-ışını aralığı arasında yer alır ve 300 MHz–300 GHz frekans aralığında iyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik dalgalar olarak tanımlanır (Mandal vd., 2007). MAE sırasında ısı oluşumu, çözücünün dielektrik özelliklerine bağlı olarak gerçekleşir; yüksek dielektrik sabitine sahip polar çözücüler (örneğin su veya etanol), mikrodalga enerjisini daha etkin şekilde absorbe eder ve bu enerjiyi ısıya dönüştürür (Bagade ve Patil, 2021). Bu ısıtma mekanizması hem dipol dönüşümü hem de iyonik iletim süreçlerinin eşzamanlı olarak gerçekleşmesiyle oluşur. Dipol dönüşümünde polar moleküller, uygulanan elektromanyetik alanla hizalanmak üzere saniyede yaklaşık 4.93×10^9 kez yön değiştirir ve bu hareket sürtünme yoluyla ısıya açığa çıkmasına neden olur (Eskilsson ve Björklund, 2000). İyonik iletimde ise çözültü içerisindeki iyonlar alan doğrultusunda hareket eder ve akış direncinin yarattığı sürtünme, önemli bir ısı kaynağı oluşturur. Bu iki mekanizma birlikte çalıştığında mikrodalga enerjisi, konvansiyonel ısıtma yöntemlerinden çok daha hızlı ve hedef odaklı bir ısı etki meydana getirir (Amran vd., 2021).

Mikrodalga ısınmasının bitkisel matris üzerindeki etkileri yalnızca sıcaklık artışıyla sınırlı değildir. Mikrodalgaların yarattığı ani ve lokal basınç yükselmeleri, bitki dokusundaki bağlı nemin hızla buharlaşmasına ve bunun sonucunda hücre duvarlarında şişme, çatlama ve yırtılmaların oluşmasına yol açar. Hücresel bütünlüğün bu şekilde bozulması, çözücünün matrise çok daha hızlı nüfuz etmesine olanak tanır ve hedeflenen fitokimyasalların çözücüye geçiş hızını belirgin şekilde artırır. Böylece ekstraksiyon sürecinin üç temel aşaması—çözücünün matrise difüzyonu, çözünen maddenin hücreden serbest kalması ve çözünen bileşiğin çözücüye salınması—mikrodalga etkisiyle hızlanır ve toplam ekstraksiyon verimi yükselir. Nitekim kabuk, posa ve yaprak gibi lignoselülozik atık matrislerinde mikrodalga uygulaması, hem hücre duvarının geçirgenliğini artırmakta hem de

biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyon kinetiğini geliştirmektedir (Rifna vd., 2023).

MAE'nin etkili olduğu fitokimyasal gruplar oldukça geniştir; literatürde saponinler, polifenoller, steroller, flavonoidler, karotenoidler, uçucu yağlar ve taksanların bu yöntemle başarıyla izole edildiği rapor edilmiştir (Feng vd., 2023). Örneğin yeşil çay ekstraktı üzerine yapılan çalışmalar, MAE optimizasyonunun toplam fenolik madde miktarını ve antioksidan aktiviteyi belirgin şekilde artırdığını; renk stabilitesinin bile geliştirilebildiğini göstermektedir (Tram vd., 2015). Havuç atıklarında yürütülen başka bir çalışmada ise karotenoid ekstraksiyonunun mikrodalga gücü ve ekstraksiyon süresi gibi işlem parametrelerine son derece duyarlı olduğu ve bu parametrelerin optimize edilmesinin ekstraksiyon verimini etkilediği ortaya konmuştur (Kaur vd., 2022). Çözücü seçimi de MAE'nin başarısı için kritiktir: yüksek dielektrik sabitine sahip çözücüler hızlı ısınma sağlarken, termolabil bileşiklerin ekstraksiyonunda mikrodalgaya karşı şeffaf çözücüler (örneğin n-heksan) kullanılarak termal bozunma riski azaltılabilir (Vinatoru vd., 2017).

Geleneksel çözücü ekstraksiyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında MAE, işlem süresinin kısalması, çözücü tüketiminin azalması, ekstraksiyon veriminin yükselmesi ve elde edilen ekstraktların biyolojik aktivitesinin korunması gibi çok sayıda avantaj sunar. Buna karşın, yüksek mikrodalga sıcaklık aralığında stabil olmayan bazı küçük moleküllü polifenollerin bozulabilme olasılığı, yöntemin dikkatli şekilde optimize edilmesini gerektirir (Mir vd., 2023). Bununla birlikte, gıda işleme sırasında klasik yöntemlerle büyük oranda kaybedilen flavonoidler gibi bileşiklerin korunmasını sağlaması, MAE'yi özellikle fonksiyonel gıda ve nutrasötik üretiminde değerli bir teknik hâline getirmektedir. Sonuç olarak MAE, mikrodalga enerjisinin bitki dokusuyla etkileşimini kontrollü şekilde kullanarak hem hücresel bozunmayı hızlandıran hem de çözücü geçişini iyileştiren bir mekanizma ile doğal ürün ekstraksiyonunu son derece verimli hâle getiren yenilikçi bir teknolojidir.

Süperkritik Akışkan Ekstraksiyonu (SFE)

Süperkritik akışkan ekstraksiyonu (SFE), bir çözücünün kritik sıcaklık ve basıncın üzerindeki koşullarda kullanıldığı, seçiciliği yüksek ve çevre dostu bir ekstraksiyon tekniğidir. Bu koşullarda çözücü ne tam olarak sıvı ne de gazdır; her iki fazın da özelliklerini bir arada taşıyan “süperkritik akışkan” hâline gelir. Bitkisel ve tarımsal kaynaklı doğal ürünlerin ekstraksiyonunda en yaygın kullanılan süperkritik çözücü karbondioksit (CO₂)’tir; çünkü kritik sıcaklığının düşük olması (31.1 °C), toksik olmaması, yanıcı olmaması ve gıda endüstrisinde GRAS (Genel Olarak Güvenli Kabul Edilen) statüsüne sahip olması, gıda, nutrasötik ve kozmetik uygulamalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır (Dias vd., 2021; Uwineza ve Waśkiewicz, 2020).

Süperkritik CO₂’nin ekstraksiyonda bu kadar cazip olmasının temel nedeni, fizikokimyasal özelliklerinin basınç ve sıcaklıkla hassas biçimde ayarlanabilmesidir. Süperkritik bölgede CO₂’nin yoğunluğu sıvıya yaklaşırken, viskozitesi ve difüzyon katsayısı gazlara benzerdir; bu sayede hem yüksek çözücü gücü hem de hızlı kütle transferi mümkündür. Basınç artırıldığında akışkanın yoğunluğu ve dolayısıyla çözme gücü artar; sıcaklığın değiştirilmesiyle de seçicilik ayarlanabilir. Böylece aynı ekipmanla, örneğin önce lipofilik yağ fraksiyonları, ardından daha polar minör bileşenler (tokotrienoller, steroller, karotenoidler vb.) fraksiyonlu olarak alınabilir (Herrero vd., 2006; Perez-Vazquez vd., 2023). Bu “ayarlanabilir çözücü gücü”, klasik çözücü ekstraksiyonuna kıyasla SFE’yi hem daha selektif hem de fraksiyonlama açısından daha güçlü bir yöntem hâline getirmektedir.

SFE prosesinin tasarımı basınç, sıcaklık, akış hızı, ekstraksiyon süresi, ko-çözücü (örneğin etanol) kullanımı, hammadde parçacık boyutu ve nem içeriği gibi bir dizi parametre kritik rol oynar. Bitkisel yağlar ve lipofilik bileşikler için tipik olarak 100–400 bar ve 35–80 °C aralığında, bazı uygulamalarda ise 500 bar seviyelerine kadar çıkan koşullar rapor edilmiştir (Vasquez vd., 2021). CO₂ kendisi apolar karakterli olduğundan, fenolik bileşikler, flavonoidler ve diğer daha polar metabolitler için genellikle %5–15 oranında etanol veya etanol/su karışımı gibi ko-çözücüler eklenerek akışkanın polaritesi artırılır ve

böylece tarım/gıda atıklarındaki polifenol fraksiyonlarının kazanımı mümkün hale gelir (Dias vd., 2021; Uwineza ve Waśkiewicz, 2020).

Son yıllarda SFE, özellikle tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünlerinin katma değerli bileşiklere dönüştürülmesi için yoğun biçimde çalışılmaktadır. Patates kabuklarından süperkritik CO₂ ve etanol ko-çözücü kullanılarak fenolik bileşiklerin ve antioksidan fraksiyonların etkin şekilde ekstrakte edilebildiği gösterilmiştir (de Andrade Lima vd., 2021). Benzer şekilde, meyve suyu endüstrisi yan ürünü olan meyve posaları ve çekirdek kekleri, süperkritik CO₂ ile hem yağ fraksiyonu hem de minör lipofilik biyoaktifler (örneğin tokoferoller, fitosteroller) açısından değerlendirilmiştir (Vasquez vd., 2021). Daha güncel bir çalışmada siyah ve kırmızı frenk üzümü posası, SFE-CO₂ ile işlenmiş; yan ürünün lipidce ve fenolikçe zengin fraksiyonlara ayrılabilirdiği ve bu fraksiyonların nutrasötik, fonksiyonel gıda ve doğal kozmetik formülasyonlarında kullanılabilecek potansiyel bileşenler sunduğu rapor edilmiştir (Herzyk ve Korzeniowska, 2025). Elma posası gibi diğer agro-endüstriyel kalıntılar üzerinde yapılan çalışmalar da, SFE'nin polifenoller ve triterpenler gibi bileşiklerin geri kazanımında güçlü bir araç olduğunu göstermektedir (Ampese vd., 2025).

SFE'nin önemli avantajlarından biri, solvent kalıntısı bırakmayan bir teknoloji olmasıdır. CO₂, ekstraksiyon sonunda basınç düşürülerek kolaylıkla gaz fazına geçer ve matrisi terk eder; ekstrakt içerisinde toksik çözücü kalıntısı bulunmaz (Perez-Vazquez vd., 2023). Ayrıca SFE'de kullanılan sıcaklıklar genellikle geleneksel yüksek sıcaklıklı ekstraksiyonlara göre daha düşüktür; bu da uçucu bileşiklerin, ısıya duyarlı aromatik bileşiklerin ve oksidasyona hassas bileşenlerin (örneğin bazı karotenoidler) daha iyi korunmasını sağlar (Capuzzo vd., 2013). Bu yönüyle SFE, uçucu yağların, bitkisel aromaların ve özel lezzet bileşiklerinin üretiminde hidro-distilasyon ve organik çözücü ekstraksiyonuna göre daha nazik ve kaliteli ürün sağlayan bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Bununla birlikte SFE'nin bazı kısıtları ve zorlukları da bulunmaktadır. CO₂'nin apolar yapısı, ko-çözücü eklenmediği durumlarda çok polar bileşiklerin ekstraksiyonunda verimi

kısıtlayabilir; ayrıca yüksek basınçlı ekipman gerektirmesi, ilk yatırım maliyetlerini artırır. Bazı karşılaştırmalı çalışmalarda, toplam ekstrakt veriminin Soxhlet veya ultrases destekli ekstraksiyona göre daha düşük, ancak hedef bileşik oranının (örneğin lipofilik biyoaktifler veya belirli fenolik alt fraksiyonlar) daha yüksek olduğu bildirilmiştir; bu da SFE'yi yüksek saflık istenen durumlarda avantajlı kılmaktadır (Argun vd., 2023; Słota vd., 2025). Güncel eğilimler, SFE'nin diğer yeşil ekstraksiyon teknikleriyle (örneğin ultrases, mikrodalga, basınçlı sıvı ekstraksiyonu) kombine edilmesi, proses yoğunlaştırma yaklaşımları ve tarımsal atıkların daha etkin değerlendirilebilmesi için yapay zekâ ve çok kriterli optimizasyon yöntemleriyle proses parametrelerinin modellenmesi yönündedir (Dias vd., 2021; Nozari ve Kander, 2025). Genel olarak bakıldığında SFE, tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünlerinin yüksek katma değerli bileşenlere dönüştürülmesinde hem çevresel açıdan sürdürülebilir hem de seçici ve esnek bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

Kritik Altı Su Ekstraksiyonu (SWE)

Kritik altı su ekstraksiyonu (SWE), suyun kaynama noktasının üzerinde (≈ 100 °C) fakat kritik sıcaklık olan 374 °C'nin altında, suyu sıvı fazda tutacak kadar yüksek basınç altında kullanıldığı bir basınçlı sıvı ekstraksiyon tekniğidir. Bu sıcaklık–basınç aralığında suyun fizikokimyasal özellikleri belirgin şekilde değişir: dielektrik sabiti ve viskozitesi düşerken, difüzyon katsayısı artar; yani su, oda sıcaklığındaki yüksek polar çözücü karakterinden uzaklaşıp metanol/etanol benzeri, daha az polar bir çözücü gibi davranmaya başlar. Böylece SWE ile yalnızca çok polar bileşikler değil, orta polariteye ve kısmen hidrofobik karaktere sahip birçok fitokimyasal (fenolik asitler, flavonoidler, bazı terpenler, organik asitler, hatta belirli lipofilik fraksiyonlar) de su kullanılarak ekstrakte edilebilmektedir (Somat vd., 2025; Zhang vd., 2020).

SWE'nin “yeşil” kabul edilmesinin temel nedeni, yalnızca suyu çözücü olarak kullanması ve organik çözücü ihtiyacını ortadan kaldırmasıdır. Su ucuz, toksik olmayan, yanıcı olmayan ve gıda ile uyumlu bir çözücü olduğundan, elde edilen ekstraktlarda çözücü kalıntısı riski bulunmaz. Yapılan araştırmalar, SWE'nin özellikle

tarımsal ve gıda endüstrisi yan ürünlerinin değerlendirilmesinde güçlü bir teknoloji olarak öne çıktığını; çekirdek kabukları, meyve posaları, kabuklar, kabuklu yemiş yan ürünleri, şarap endüstrisi atıkları, kahve telvesi ve baharat atıkları gibi lignoselülozik matrislerden biyoaktif bileşik kazanımında yoğun şekilde çalışıldığını göstermektedir (Abbasi-Parizad vd., 2022; Valencia-Hernandez vd., 2021).

SWE'nin verim ve seçiciliği büyük ölçüde sıcaklık, basınç, ekstraksiyon süresi, katı/sıvı oranı ve hammadde özelliklerine bağlıdır. Fenolik bileşiklerin geri kazanımına odaklanan bir çalışmada, sıcaklığın 25–260 °C, sürenin 5–90 dakika ve katı/sıvı oranının 1:5–1:50 (w:v) aralığında değiştirilmesiyle, distilasyon posasından elde edilen polifenol miktarının ve antioksidan aktivitenin anlamlı şekilde modüle edilebildiği gösterilmiştir (Mikucka vd., 2022). Sıcaklık yükseldikçe suyun polaritesi azaldığından, daha hidrofobik fenolikler ve aglikon formundaki flavonoidler çözünür hâle gelir; ancak aynı zamanda termolabil bileşiklerde bozunma riski artar. Bu nedenle, optimum SWE koşulları her hammadde ve hedef bileşik grubu için deneysel olarak belirlenmekte; sıklıkla yanıt yüzey metodolojisi (RSM) ve çok kriterli optimizasyon yaklaşımlarıyla modeller oluşturulmaktadır (Anoraga vd., 2024)

Tarımsal endüstriyel atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi bağlamında SWE'ye dair çok sayıda somut uygulama bulunmaktadır. Badem endüstrisi yan ürünü olan badem kabuğunda, 160 ve 180 °C'de uygulanan SWE ile bir yandan fenolikçe zengin, suda çözünebilir ekstrakt fraksiyonu; diğer yandan selüloz liflerince zengin, katı rezidü fraksiyonu elde edilmiş; sıcaklık arttıkça toplam fenolik miktarı ve antioksidan aktivitenin yükseldiği, buna karşın lif fraksiyonunda yapısal değişimlerin gözlendiği rapor edilmiştir (Freitas vd., 2023). Benzer şekilde, beyaz şarap endüstrisi yan ürünü olan wine lees üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, SWE ile antioksidan bileşiklerin yüksek verimle ekstrakte edilebildiği ve ekstraktların in vitro antioksidan kapasitelerinin oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir (Poulain vd., 2024). Pancar işleme atıklarının, domates işleme atıklarının ve mısır sapının değerlendirilmesine yönelik yeni çalışmalar da, subkritik suyun hem fenolik bileşiklerin hem de belirli şeker/oligosakkarit fraksiyonlarının geri kazanımında etkili olduğunu

göstermektedir (Da Rosa vd., 2025; de Carvalho vd., 2025). Benzer şekilde, subkritik su ile elde edilen polifenolce zengin ekstraktların konvansiyonel metanol/etanol ekstraktlarına kıyasla daha yüksek antimikrobiyal aktivite göstermesi, su bazlı bu yöntemin gıda koruyucu formülasyonlarda da potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır (Žagar vd., 2024).

SWE'nin avantajları kadar dikkate alınması gereken bazı sınırlılıkları da vardır. Yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren proses koşulları, ekipman yatırım maliyetlerini artırır ve güvenlik önlemlerini kritik hâle getirir. Ayrıca sıcaklığın aşırı yükselmesi durumunda Maillard reaksiyonları, karamelizasyon ya da fenoliklerin parçalanması gibi istenmeyen yan reaksiyonlar ortaya çıkabilir; bu da ekstraktın renk, aroma ve fonksiyonel özelliklerini olumsuz etkileyebilir (de Carvalho vd., 2025; Zhang vd., 2020). Bununla birlikte, uygun sıcaklık–süre–katı/sıvı oranı kombinasyonlarının dikkatli optimizasyonu ile SWE, organik çözücü kullanmaksızın yüksek fenolik verimi, güçlü antioksidan aktivite ve temiz ekstrakt profilleri sağlayabilen son derece cazip bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Güncel eğilimler, SWE'nin ultrason, mikrodalga ve basınçlı etanol ekstraksiyonu gibi diğer yeşil tekniklerle entegre edilmesi ve tarımsal atıkların çok basamaklı fraksiyonlanmasıyla daha kompleks ürün hatlarının geliştirilmesi yönündedir (Krivošija vd., 2025; Somat vd., 2025).

Tarımsal ve Gıda Atıklarının Ekstraksiyonunda Yapay Zekâ Tabanlı Optimizasyon

Tarımsal ve gıda atıklarından biyoaktif bileşiklerin geri kazanımı, çok sayıda proses parametresinin aynı anda devreye girdiği, non-lineer bir sistemdir. Günümüzde ekstraksiyon süreçlerinin iyileştirilmesinde en sık başvurulan yöntemler arasında matematiksel modelleme ve Tepki Yüzeyi Metodolojisi (RSM) yer almaktadır. Matematiksel modelleme, deney sayısını azaltma potansiyeli sayesinde hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajlar sunar; ayrıca çözücü tüketiminin azaltılmasına ve enerji kullanımının düşürülmesine katkı sağlayarak sürecin toplam verimliliğini artırır. Bu yaklaşımda, elde edilen deneysel veriler uygun kinetik ve kütle transferi modelleriyle ilişkilendirilir ve sistemin davranışını tanımlayan denklemler

yardımla hedef değişkenlere yönelik tahminler yapılır. Böylece, deneysel olarak test edilmesi güç veya maliyetli olan çok sayıda koşul, model tabanlı analizle değerlendirilebilir hâle gelir. RSM ise, birden fazla proses parametresi ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkileri açıklayan istatistiksel bir optimizasyon tekniğidir. Faktörlerin bireysel etkilerini ve aralarındaki etkileşimleri ortaya koyarak optimal işlem koşullarının belirlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, varyans analizi (ANOVA) gibi istatistiksel araçlarla desteklenmesi, bu yöntemin sonuçlarının güvenilirliğini artırır. Ancak RSM'nin etkili bir şekilde uygulanabilmesi, deney tasarımının doğru seçilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Yanlış veya yetersiz deney tasarımları, model uyumunun zayıflamasına, genelleme kabiliyetinin düşmesine ve parametrelerin aşırı uyumlanmasına (overfitting) neden olabilir. Bu durum, elde edilen optimum koşulların tahmin doğruluğunu azaltarak uygulamada güvenilir olmayan sonuçlar ortaya çıkarabilir (Liu vd., 2023; Subramani vd., 2025).

Bu boşluğu doldurmak üzere, son yıllarda yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (ML) temelli modeller, ekstraksiyon süreçlerinin modellenmesi ve çok boyutlu optimizasyonu için yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. YZ, insanın bilişsel yeteneklerini taklit eden ve problem çözme, karar verme, modelleme gibi görevleri üstlenen geniş bir disiplinken, ML bu şemsiyenin altında “veriye dayalı öğrenme ve tahmin” yapan teknikleri kapsar. Bu bağlamda, ML algoritmaları ekstraksiyon koşulları ile elde edilen veriler arasındaki karmaşık ve çoğu zaman doğrusal olmayan ilişkileri öğrenerek modelleyebilmekte; böylece optimum işlem koşullarının tahmin edilmesine, deney sayısının azaltılmasına ve enerji-çözücü kullanımının minimize edilmesine olanak sağlamaktadır (Bouaziz vd., 2025). YL tabanlı yaklaşımlar ise yalnızca tahminleme yapmakla sınırlı kalmayıp, karar verme ve süreç tasarımını bütüncül biçimde optimize ederek, çok boyutlu parametre uzayında en uygun çözüm bölgelerinin akıllı arama algoritmalarıyla belirlenmesini, ekstraksiyon verimini etkileyen gizli etkileşimlerin ortaya çıkarılmasını ve prosesin genel performansının iyileştirilmesini mümkün kılmaktadır (Fajardo Muñoz vd., 2023). Bu sayede, YZ ve ML tabanlı modeller; bitkisel ve tarımsal atıklardan biyoaktif bileşiklerin sürdürülebilir, hızlı ve maliyet etkin şekilde elde edilmesini destekleyen

güçlü araçlar hâline gelmiştir. Özellikle yapay sinir ağları (ANN), adaptif bulanık çıkarım sistemleri (ANFIS), destek vektör regresyonu (SVR), rastgele orman (RF) ve bunlarla entegre genetik algoritma (GA), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) gibi algoritmalar; tarımsal ve gıda atıklarından biyoaktif bileşik elde etmeye yönelik yeşil ekstraksiyon tekniklerinin optimizasyonunda oldukça güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır.

Yapay Sinir Ağları (ANN)

Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks, ANN), insan beynindeki nöronların işleyişinden esinlenen, çok katmanlı ve doğrusal olmayan ilişkileri modellemede son derece güçlü hesaplama yapılarıdır. Girdi (süre, sıcaklık, çözücü oranı, güç vb.) ile çıktı (ekstraksiyon verimi, toplam fenolik, antioksidan aktivite, spesifik bileşik konsantrasyonu) arasındaki karmaşık ve non-lineer ilişkileri öğrenebilme kapasitesi nedeniyle, biyoaktif bileşik ekstraksiyonunda proses modelleme ve optimizasyonda sıkça kullanılmaktadır. ANN modellerinde, deneysel ekstraksiyon verileri ile ağ eğitilir; ağırlıkların iteratif güncellenmesiyle tahmin hatası minimize edilir. Bu sayede klasik istatistiksel yöntemlerde gözden kaçabilen etkileşimler ve yüksek dereceli non-lineerlikler başarıyla yakalanabilmektedir (Subramani vd., 2025)

Son yıllarda, tarımsal ve gıda atıklarından biyoaktif bileşik ekstraksiyonunda ANN tabanlı model ve optimizasyon çalışmalarının belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Nar kabuğundan fenolik bileşik ekstraksiyonu üzerine yapılan çalışmada, RSM ile ANN–Genetik Algoritma (ANN–GA) yaklaşımı karşılaştırılmış; ANN tabanlı modelin daha yüksek determinasyon katsayısı (R^2) ve daha düşük hata değerleriyle ekstraksiyon koşullarını tahmin ettiği, ayrıca GA ile birleştirildiğinde optimum koşullara daha verimli ulaşıldığı gösterilmiştir (Uca ve Güleç, 2024). Benzer şekilde Sarımsak yaprağından UAE ile toplam fenolik, flavonoid ve antioksidan aktivitenin optimizasyonunda ANN tabanlı modellemeyi kullanmış ve ANN’in ekstraksiyon parametrelerini öngörmeye son derece başarılı olduğunu bildirmiştir (Shekhar vd., 2023) *Opuntia ficus-indica cladode*’larından mikrodalga destekli ekstraksiyonla (MAE) fenolik

bileşik geri kazanımında ANN–GA yaklaşımının RSM’ye göre daha iyi performans göstermesi de, ANN tabanlı hibrit optimizasyonun yeşil ekstraksiyon süreçleri için güçlü bir araç olduğunu desteklemektedir (Oufighou vd., 2025).

Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemleri (ANFIS)

Adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemleri (ANFIS), bulanık mantık ile yapay sinir ağlarının hibrit birleştirilmiş hâlidir ve hem insan uzmanlığını yansıtan “eğer–ise” tarzı bulanık kuralları hem de veriden otomatik öğrenme yeteneğini bir araya getirir. ANFIS modellerinde, giriş ve çıkış verileri kullanılarak hem bulanık kümeleri tanımlayan matematiksel eğriler hem de bu kümeler arasında bağlantı kuran kurallar otomatik olarak güncellenir; böylece model zamanla gerçek verilere uyum sağlayacak şekilde kendini iyileştirir. Ekstraksiyon gibi çok parametrelili ve non-lineer sistemlerde, ANFIS özellikle parametre–yanıt ilişkilerini modellemede ve çoklu hedef fonksiyonlarını optimize etmede tercih edilmektedir (Kunjiappan vd., 2024; Oke vd., 2020).

Biyoaktif bileşik ekstraksiyonuna yönelik literatürde ANFIS’in kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Kunjiappan ve ark. (2024), üzüm çekirdeğinden (grape seed) polifenol ekstraksiyonunu optimize etmek için RSM, ANFIS ve farklı ML algoritmalarını karşılaştırmış; ANFIS modelinin, özellikle toplam polifenol içeriği ve antioksidan aktivitenin tahmininde yüksek doğruluk sağladığını ve optimum parametre kombinasyonlarının belirlenmesinde güçlü bir araç olduğunu rapor etmiştir (Kunjiappan vd., 2024) Ganje ve ark. (2025) ise olgun jamun meyvesinden polifenol ekstraksiyonunu modellemek için ANFIS tabanlı çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı geliştirmiş, ANFIS’in RSM’ye kıyasla daha düşük hata değerleri ve daha yüksek korelasyon katsayısı sunduğunu göstermiştir (Ganje vd., 2025) *Azadirachta indica* yapraklarından polifenol ekstraksiyonunda ANFIS’in Cuckoo Search ve GA gibi sezgisel algoritmalarla hibrit kullanıldığı çalışmalar da, ANFIS’in özellikle yeşil ekstraksiyon parametrelerinin optimizasyonunda giderek daha fazla tercih edildiğini ortaya koymaktadır (Oke vd., 2020).

Destek Vektör Regresyonu (SVR)

Destek vektör regresyonu (SVR), destek vektör makineleri (SVM) yaklaşımının regresyon problemlerine uyarlanmış hâli olup, özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık veri setlerinde iyi genelleme performansı sergilemesiyle bilinir. SVR, girdi uzayını çekirdek fonksiyonları (lineer, polinomsal, RBF, vb.) kullanarak daha yüksek boyutlu özellik uzayına dönüştürür ve bu uzayda hata toleranslı en iyi regresyon düzlemini bulmaya çalışır. Parametre sayısı az, model yapısı kompakt ve aşırı öğrenmeye karşı dayanıklı olduğu için, ekstraksiyon süreçlerinde çözünen madde verimi, çözünürlük, biyoaktif konsantrasyonu gibi sürekli yanıtların tahmininde uygun bir araçtır (Zhang ve Mahdi, 2023).

Süperkritik CO₂ ekstraksiyonu ve çözünürlük modellemesi alanında SVR'nin kullanıldığı pek çok çalışma vardır. Moussaoui ve ark. (2020), 145 katı solüt için Süperkritik CO₂'de çözünürlüğü tahmin etmek amacıyla SVR ve ANN temelli nicel yapı-özellik ilişkisi (QSPR) modelleri geliştirmiş ve SVR'nin karmaşık termodinamik ilişkileri yakalamada başarılı olduğunu göstermiştir (Moussaoui vd., 2020). Zhang ve Mahdi (2023), lornoksikamın süperkritik CO₂ içindeki çözünürlüğünü modellemek için kuadratik çekirdekli SVR (QSVR) yaklaşımını kullanmış; QSVR modelinin deneysel verilerle yüksek uyum sağladığını ve sıcaklık-basınç parametrelerinin optimizasyonunda kullanılabilir olduğunu rapor etmiştir (Zhang ve Mahdi, 2023). Sharma ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmada, kimyon tohumlarından uçucu yağ elde edilmesini modellemek amacıyla RSM ve SVR tabanlı tahmin modelleri geliştirilmiş ve mikrodalga destekli ekstraksiyonun verim üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, SVR'nin RSM'ye kıyasla daha yüksek doğrulukla optimum koşulları belirlediğini ve MAE sürecinin başarıyla modellenebildiğini göstermiştir (Khan vd., 2024).

Rastgele Orman (RF)

Rastgele orman (Random Forest, RF), çok sayıda karar ağacından oluşan ve bu ağaçların çoğunluk oyuna dayalı çıktısını kullanan bir topluluk (ensemble) öğrenme yöntemidir. Her ağaç, eğitim verisinin rastgele seçilmiş bir alt kümesi ve özelliklerin rastgele bir alt kümesiyle

eğitildiği için, model hem güçlü hem de aşırı öğrenmeye karşı dayanıklıdır. RF, karmaşık non-lineer ilişkileri modellemede, değişken önemini belirlemede ve gürültülü veriyle baş etmede oldukça etkilidir. Ekstraksiyon özelinde RF, özellikle geniş parametre alanına sahip deneysel tasarımlarda, hangi faktörlerin ekstraksiyon verimi üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu belirlemede ve ön tahminlerde kullanılabilmektedir (Tamayo-Vera vd., 2025).

Her ne kadar RF, doğrudan ekstraksiyon optimizasyonundan ziyade tarımsal üretim ve gıda sistemlerinin modellemesinde daha yaygın görünse de, bu alanlarda elde edilen başarıları ekstraksiyon süreçlerine uyarlamak mümkündür. Asamoah ve ark. (2024), mısır verimini iklim, toprak ve agronomik verilerle birlikte RF ile modelleyerek; RF'nin karmaşık biyofiziksel sistemlerde yüksek tahmin doğruluğu sağladığını göstermiştir (Asamoah vd., 2024) Benzer şekilde Yáñez-Cajo ve ark. (2025), muz verimini fenolojik, toprak ve spektral verilerle birlikte RF modeliyle tahmin etmiş; RF'nin veri zengin tarımsal sistemlerde güçlü bir karar destek aracı olabileceğini ortaya koymuştur (Yáñez-Cajo vd., 2025). Bu çalışmalar, RF yaklaşımının tarımsal ve gıda sistemlerinde parametre duyarlılığı analizi, öngörü ve optimizasyonda kullanılabileceğini göstererek, benzer şekilde ekstraksiyon süreçlerinde de parametre ön elemesi, faktör önem sıralaması ve veri odaklı süreç tasarımı için uygun bir araç olduğunu ima etmektedir.

Genetik Algoritma (GA)

Genetik algoritmalar (GA), doğal seçim ve evrim prensiplerine dayanan sezgisel optimizasyon yöntemleridir. Çözüm adayları “birey” veya “kromozom” olarak temsil edilir; bu bireyler popülasyon hâlinde değerlendirilir ve uygunluk fonksiyonuna (örneğin ekstraksiyon verimi, toplam fenolik, enerji tüketimi) göre seçilerek çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleriyle yeni nesiller üretilir. GA'lar, çok tepeli (multimodal), doğrusal olmayan ve türev bilgisi gerektirmeyen problemlerde, özellikle global optimuma yakın çözümler bulma potansiyeli nedeniyle ekstraksiyon optimizasyonunda sıkça tercih edilir (Patra vd., 2021).

Ekstraksiyon alanında GA çoğunlukla ANN veya ANFIS ile hibrit kullanılır. Patra ve ark. (2021), kaju elması bagasından (cashew apple

bagasse) ultrases destekli ekstraksiyonla fenolik bileşiklerin geri kazanımını çalışmış; ANN–GA hibrit yaklaşımıyla ekstraksiyon parametrelerini (süre, sıcaklık, ultrason gücü, katı/sıvı oranı) optimize etmiş ve bu yaklaşımın hem verim hem de antioksidan aktivite açısından klasik RSM’den üstün olduğunu göstermiştir (Patra vd., 2021). Oufighou ve ark. (2025), *Opuntia ficus-indica cladode*’larından MAE ile fenolik geri kazanımında ANN–GA yaratıcı kombinasyonu kullanmış; ANN’in süreç modellemesinde, GA’nın ise optimum koşulların aranmasında etkin olduğunu ve birlikte kullanıldığında hem yüksek verim hem de iyi model performansı sağladığını rapor etmiştir (Oufighou vd., 2025). *Azadirachta indica* yapraklarından mikrodalga destekli ekstraksiyonla polifenolik ekstrakt elde edilmesine odaklanan bir çalışmada, GA–ANFIS modeli ve Cuckoo Search algoritması birlikte kullanılarak çok kriterli optimizasyon gerçekleştirilmiş ve GA’nın ANFIS tabanlı tahminleri iyileştirmede etkili olduğunu gösterilmiştir (Oke vd., 2023). Bu örnekler, GA’nın tek başına bir süreç modeli olmaktan ziyade, ANN ve ANFIS gibi tahmin modelleriyle entegre edildiğinde ekstraksiyon parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonu için güçlü bir meta-sezgisel aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

ZORLUKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Tarımsal ve gıda atıklarından katma değeri yüksek biyoaktif bileşiklerin elde edilmesinde kullanılan modern ekstraksiyon yöntemleri ile yapay zekâ tabanlı optimizasyon yaklaşımları, son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da, bu alan hâlâ çeşitli teknik, ekonomik ve yapısal zorluklarla karşı karşıyadır. Birincil zorluk, tarımsal atıkların heterojen yapısı, bileşen dağılımındaki mevsimsel ve coğrafi değişkenliktir; bu durum hem ekstraksiyon verimini hem de makine öğrenmesi modellerinin genellenebilirliğini sınırlandıran önemli bir belirsizlik kaynağıdır. Ayrıca UAE, MAE, SWE veya SFE gibi yeşil ekstraksiyon teknolojilerinin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe aktarımı sırasında enerji tüketimi, ekipman maliyeti, sürekli akış tasarımları ve proses güvenliği gibi konular büyük teknik engeller yaratmaktadır. Yapay zekâ modelleri için ise nitelikli veri eksikliği, farklı ekstraksiyon tekniklerinde standardize edilmiş veri formatlarının bulunmaması, geniş veri setleri

olmadan geliştirilen ML modellerinde aşırı öğrenme sorunu ve algoritmaların karar süreçlerindeki “kara kutu” özelliği, güvenilirlik ve şeffaflık açısından önemli kısıtlar oluşturmaktadır.

Tüm bu zorluklara rağmen, gelecek perspektifleri oldukça güçlüdür. Önümüzdeki yıllarda, ekstraksiyon süreçlerinin dijital ikiz modelleriyle gerçek zamanlı olarak simüle edilebilmesi; ANN, ANFIS ve SVR modellerinin çoklu optimizasyon algoritmaları (GA, PSO, DE vb.) ile hibritleştirilmiş gelişmiş versiyonlarının kullanımı; ekstrakt verimi, saflığı ve enerji tüketimini aynı anda maksimize eden çok amaçlı optimizasyon çerçevelerinin yaygınlaşması beklenmektedir. Ayrıca, biyokütle kaynaklarının kimyasal bileşimindeki değişkenliği azaltmak amacıyla standartlaştırılmış ön işleme protokolleri, sensör tabanlı kalite izleme sistemleri ve spektral analizler (NIR, Raman) ile entegre çalışan yapay zekâ modellerinin geliştirilmesi, geleceğin en kritik çalışma alanları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, sürdürülebilir üretim gereklilikleri kapsamında daha düşük enerji tüketimli ekstraksiyon sistemleri, yeniden kullanılabilir çözücü platformları ve proses atıklarının döngüsel ekonomiye kazandırıldığı tam entegre biyorafinasyon sistemleri daha fazla önem kazanacaktır. Zaman içinde, veri paylaşım platformlarının gelişmesiyle birlikte, farklı araştırma grupları tarafından oluşturulan çok merkezli veri setlerinin açık erişimli hâle gelmesi, yapay zekâ modellerinin doğruluğunu ve genellenebilirliğini büyük ölçüde artıracaktır. Sonuç olarak, disiplinler arası entegrasyonun güçlenmesi, özellikle kimya mühendisliği, biyoteknoloji, veri bilimi ve yapay zekâ alanlarının ziraat bilimi ile birlikte çalışması sayesinde; tarımsal üretimden işleme aşamasına uzanan tüm süreçlerde atıkların yüksek katma değere dönüştürüldüğü, çevreci, ekonomik ve ölçeklenebilir ekstraksiyon sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olacak ve bu bütünlüklü yaklaşım geleceğin standart üretim modeli hâline gelecektir.

KAYNAKÇA

- Abbasi-Parizad, P., Scarafoni, A., Pilu, R., Scaglia, B., De Nisi, P., & Adani, F. (2022). The recovery from agro-industrial wastes provides different profiles of anti-inflammatory polyphenols for tailored applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 996562.
- Akyol, H., Riciputi, Y., Capanoglu, E., Caboni, M. F., & Verardo, V. (2016). Phenolic compounds in the potato and its byproducts: An overview. *International journal of molecular sciences*, 17(6), 835.
- Alloun, W., & Calvio, C. (2024). Bio-driven sustainable extraction and ai-optimized recovery of functional compounds from plant waste: A comprehensive review. *Fermentation*, 10(3), 126.
- Ampese, L. C., Ziero, H. D. D., Velasquez-Pinas, J. A., Baldino, L., Reverchon, E., & Forster-Carneiro, T. (2025). Extraction of phenolic acids, flavonoids, and triterpenes from apple pomace via supercritical Technology: A Systematic review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 67, 103692. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103692>
- Amran, M. A., Palaniveloo, K., Fauzi, R., Satar, N. M., Mohidin, T. B. M., Mohan, G., Razak, S. A., Arunasalam, M., Nagappan, T., & Sathiya Seelan, J. S. (2021). Value-added metabolites from agricultural waste and application of green extraction techniques. *Sustainability*, 13(20), 11432.
- Anoraga, S. B., Shamsudin, R., Hamzah, M. H., Sharif, S., Saputro, A. D., & Basri, M. S. M. (2024). Optimization of subcritical water extraction for pectin extraction from cocoa pod husks using the response surface methodology. *Food Chemistry*, 459, 140355.
- Argun, M. E., Öztürk, A., & Argun, M. Ş. (2023). Comparison of different extraction methods on the recovery efficiencies of valuable components from orange peels. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 11(12), 2417-2425.
- Asamoah, E., Heuvelink, G. B. M., Chairi, I., Bindraban, P. S., & Logah, V. (2024). Random forest machine learning for maize yield and agronomic efficiency prediction in Ghana. *Heliyon*, 10(17), e37065. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37065>
- Bagade, S. B., & Patil, M. (2021). Recent advances in microwave assisted extraction of bioactive compounds from complex herbal samples: a review. *Critical reviews in analytical chemistry*, 51(2), 138-149.
- Barros, F. F., Simiqueli, A. P., de Andrade, C. J., & Pastore, G. M. (2013). Production of Enzymes from Agroindustrial Wastes by Biosurfactant-Producing Strains of *Bacillus subtilis*. *Biotechnol Res Int*, 2013, 103960. <https://doi.org/10.1155/2013/103960>
- Bekavac, N., Krog, K., Stanić, A., Šamec, D., Šalić, A., Benković, M., Jurina, T., Gajdoš Kljusurić, J., Valinger, D., & Jurinjak Tušek, A. (2025). Valorization of Food Waste: Extracting Bioactive Compounds for Sustainable Health and Environmental Solutions. *Antioxidants*, 14(6), 714.
- Bouaziz, I., Hentabli, M., Amar, M. K., Laidi, M., Bouzidi, A., Bouzemlal, H., Chabane, A., Amrane, A., & Hanini, S. (2025). Application of Deep Learning and Machine Learning Models with Enhanced Feature Extraction for the Prediction of Plant Extraction Yields using Supercritical CO₂: An Optimization and Comparative Analysis. *The Journal of Supercritical Fluids*, 106755.
- Bundhoo, Z. M., & Mohee, R. (2018). Ultrasound-assisted biological conversion of biomass and waste materials to biofuels: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 40, 298-313.
- Capuzzo, A., Maffei, M. E., & Occhipinti, A. (2013). Supercritical fluid extraction of plant flavors and fragrances. *Molecules*, 18(6), 7194-7238.
- Cecilia, J., García-Sancho, C., Maireles-Torres, P., Luque, R., Bastidas-Oyanedel, J., & Schmidt, J. (2019). Biorefinery. In: Springer Cham.
- Chemat, F., Abert-Vian, M., Fabiano-Tixier, A. S., Strube, J., Uhlenbrock, L., Gunjevic, V., & Cravotto, G. (2019). Green extraction of natural products. Origins, current status, and future challenges. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 248-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.05.037>

- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Ciftci, H., Caliskan, C. E., Koc, H., Ozturk, K., Ozkaya, A., & Erbesler, Z. A. (2024). Alleviation of aluminum-induced oxidative stress, trace element, and mineral levels in rat tissues protective role of pomegranate juice (*Punica granatum* L.). *Biological Trace Element Research*, 202(9), 4146-4157.
- Da Rosa, R. G., Castro, L. E. N., Barroso, T. L. C. T., Ferreira, V. C., Bittencourt, P. R. S., Rostagno, M. A., & Forster-Carneiro, T. (2025). Valorizing corn stover waste into valuable bioproducts using subcritical water hydrolysis. *Biofuel Research Journal*, 12(1), 2283-2305.
- Das, P., Nayak, P. K., & Kesavan, R. k. (2025). Artificial neural networks (ANN)-genetic algorithm (GA) optimization on thermosonicated acocha juice: kinetic and thermodynamic perspectives of retained phytochemicals. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 55(2), 171-186.
- de Andrade Lima, M., Andreou, R., Charalampopoulos, D., & Chatzifragkou, A. (2021). Supercritical carbon dioxide extraction of phenolic compounds from potato (*Solanum tuberosum*) peels. *Applied Sciences*, 11(8), 3410.
- de Carvalho, M. C., Freitas, P. A., Jagus, R. J., Agüero, M. V., & Chiralt, A. (2025). Valorization of Beetroot Waste via Subcritical Water Extraction for Developing Active Food Packaging Materials. *Molecules*, 30(9), 1928.
- Delkash, M. (2025). Air Emissions from Combustion and Incineration Processes: Insights into Air Quality and US EPA Regulations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 237(2), 104. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08765-7>
- Dey, S., Talukdar, A., & Bhattacharya, S. (2025). Microbial degradation and valorization of food wastes: waste to wealth approaches towards sustainability. *Discover Chemistry*, 2(1), 1-22.
- Dias, A. L. B., de Aguiar, A. C., & Rostagno, M. A. (2021). Extraction of natural products using supercritical fluids and pressurized liquids assisted by ultrasound: Current status and trends. *Ultrason Sonochem*, 74, 105584. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105584>
- Eskilsson, C. S., & Björklund, E. (2000). Analytical-scale microwave-assisted extraction. *Journal of chromatography A*, 902(1), 227-250.
- Fajardo Muñoz, S. E., Freire Castro, A. J., Mejía Garzón, M. I., Páez Fajardo, G. J., & Páez Gracia, G. J. (2023). Artificial intelligence models for yield efficiency optimization, prediction, and production scalability of essential oil extraction processes from citrus fruit exocarps. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 1055744.
- Feng, T., Zhang, M., Sun, Q., Mujumdar, A. S., & Yu, D. (2023). Extraction of functional extracts from berries and their high quality processing: A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(24), 7108-7125.
- Freitas, P. A., Martín-Pérez, L., Gil-Guillén, I., González-Martínez, C., & Chiralt, A. (2023). Subcritical water extraction for valorisation of almond skin from almond industrial processing. *Foods*, 12(20), 3759.
- Ganje, M., Gharibi, S., Nejatpour, F., Deilampour, M., Goshadehrou, K., Saberyan, S., & Abdi, G. (2025). The ANFIS-RSM based multi-objective optimization and modelling of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from jamun fruit (*Syzygium cumini*). *Ultrasonics sonochemistry*, 113, 107227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107227>
- Gul, K., Yousuf, B., Singh, A., Singh, P., & Wani, A. A. (2015). Rice bran: Nutritional values and its emerging potential for development of functional food—A review. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 6(1), 24-30.
- Herrero, M., Cifuentes, A., & Ibañez, E. (2006). Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae

- and microalgae: A review. *Food Chemistry*, 98(1), 136-148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058>
- Herzyk, F., & Korzeniowska, M. (2025). Optimisation of Supercritical CO₂ Extraction from Black (*Ribes nigrum*) and Red (*Ribes rubrum*) Currant Pomace. *Applied Sciences*, 15(16), 9222.
- Hu, Y., Li, H., Yin, K., Chen, J., & Wang, F. (2025). Status quo and trend of development of comprehensive resource utilization of citrus by-products. *Journal of Future Foods*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.10.014>
- Kaur, P., Subramanian, J., & Singh, A. (2022). Green extraction of bioactive components from carrot industry waste and evaluation of spent residue as an energy source. *Scientific reports*, 12(1), 16607.
- Khan, A. A., Zaidi, S., Qureshi, F., Yusuf, M., Al-Kahtani, A. A., Kamyab, H., Gupta, M., Pandit, B., Gill, H. S., & Ibrahim, H. (2024). Response surface optimization and support vector regression modeling of microwave-assisted essential oil extraction from cumin seeds. *Industrial crops and products*, 208, 117895. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117895>
- Krivošija, S., Ballesteros-Gómez, A., Zloh, M., Milić, N., Popović, A., Nastić, N., & Vidović, S. (2025). Subcritical Water and Pressurised Ethanol Extractions for Maximum Recovery of Antioxidants from Orange Peel Herbal Dust with Evaluation of Its Pharmacological Potential Using In Silico and In Vitro Analysis. *Antioxidants*, 14(6), 638.
- Kunjiappan, S., Ramasamy, L. K., Kannan, S., Pavadai, P., Theivendren, P., & Palanisamy, P. (2024). Optimization of ultrasound-aided extraction of bioactive ingredients from *Vitis vinifera* seeds using RSM and ANFIS modeling with machine learning algorithm. *Scientific reports*, 14(1), 1219. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49839-y>
- Liu, Z., Wang, S., Zhang, Y., Feng, Y., Liu, J., & Zhu, H. (2023). Artificial intelligence in food safety: A decade review and bibliometric analysis. *Foods*, 12(6), 1242.
- Lopes, J. D. C., Madureira, J., Margaça, F. M. A., & Cabo Verde, S. (2025). Grape Pomace: A Review of Its Bioactive Phenolic Compounds, Health Benefits, and Applications. *Molecules*, 30(2). <https://doi.org/10.3390/molecules30020362>
- Lucarini, M., Durazzo, A., Bernini, R., Campo, M., Vita, C., Souto, E. B., Lombardi-Boccia, G., Ramadan, M. F., Santini, A., & Romani, A. (2021). Fruit wastes as a valuable source of value-added compounds: A collaborative perspective. *Molecules*, 26(21), 6338.
- Luo, J., Fang, Z., & Smith Jr, R. L. (2014). Ultrasound-enhanced conversion of biomass to biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 41, 56-93.
- Lv, N., Wu, R., Guo, R., Wu, L., Zhang, H., Guo, C., & Xu, J. (2025). Exploring the progress and challenges of ultrasonic technology in environmental remediation. *Ultrasonics sonochemistry*, 112, 107175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107175>
- Mandal, V., Mohan, Y., & Hemalatha, S. (2007). Microwave assisted extraction—an innovative and promising extraction tool for medicinal plant research. *Pharmacognosy reviews*, 1(1), 7-18.
- Mao, Y., Liu, Y., Zhuo, L., Wang, W., Li, M., Feng, B., & Wu, P. (2021). Quantitative evaluation of spatial scale effects on regional water footprint in crop production. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105709. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105709>
- Medina-Torres, N., Ayora-Talavera, T., Espinosa-Andrews, H., Sánchez-Contreras, A., & Pacheco, N. (2017). Ultrasound assisted extraction for the recovery of phenolic compounds from vegetable sources. *Agronomy*, 7(3), 47.
- Mikucka, W., Zielinska, M., Bulkowska, K., & Witonska, I. (2022). Subcritical water extraction of bioactive phenolic compounds from distillery stillage. *Journal of Environmental Management*, 318, 115548. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115548>

- Mir, S. A., Rizwan, D., Bakshi, R. A., Wani, S. M., & Masoodi, F. A. (2023). Extraction of carotenoids from agro-industrial waste. In *Extraction of natural products from agro-industrial wastes* (pp. 157-178). Elsevier.
- Moussaoui, M., Laidi, M., Hanini, S., & Hentabli, M. (2020). Artificial neural network and support vector regression applied in quantitative structure-property relationship modelling of solubility of solid solutes in supercritical CO₂. *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske*, 69(11-12), 611-630.
- Mudaliyar, P., Sharma, L., & Kulkarni, C. (2012). Food waste management-lactic acid production by *Lactobacillus* species. *International journal of advanced biological research*, 2(1), 34-38.
- Nozari, B., & Kander, R. (2025). Supercritical CO₂ technology for biomass extraction: Review. *Industrial crops and products*, 233, 121348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121348>
- Oke, E., Adeyi, O., Okolo, B., Adeyi, J., Ayanyemi, J., Osoh, K., & Adegoke, T. (2020). Phenolic compound extraction from Nigerian *Azadirachta indica* leaves: response surface and neuro-fuzzy modelling performance evaluation with Cuckoo search multi-objective optimization. *Results in Engineering*, 8, 100160.
- Oke, E., Adeyi, O., Okolo, B., Adeyi, J., Ude, C. J., Okhale, S., Otolorin, J., Nnabodo, D., Ajala, O., & Anyanwu, A. (2023). Polyphenolic Extract Recovery from *Azadirachta indica* Leaves via Green Microwave-Assisted Extraction Technology: GA-ANFIS Prediction, Cuckoo Search Algorithm Optimization and ASPEN-Based Scale-Up Techno-economics. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 7(4), 689-708.
- Oufighou, A., Brahmi, F., Achat, S., Yekene, S., Slimani, S., Arroul, Y., Boulekbache-Makhlouf, L., & Blando, F. (2025). Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from *Opuntia ficus-indica* Cladodes. *Processes*, 13(3), 724.
- Patra, A., Abdullah, S., & Pradhan, R. C. (2021). Application of artificial neural network-genetic algorithm and response surface methodology for optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from cashew apple bagasse. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), e13828.
- Perez-Vazquez, A., Barciela, P., Carpena, M., Donn, P., Seyyedi-Mansour, S., Cao, H., Fraga-Corral, M., Otero, P., Simal-Gandara, J., & Prieto, M. A. (2023). Supercritical fluid extraction as a potential extraction technique for the food industry. *Engineering Proceedings*, 37(1), 115.
- Poulain, B., Winstel, D., Massot, A., Moine, V., & Nioi, C. (2024). Valorisation of white wine lees: optimisation of subcritical water extraction of antioxidant compounds. *OENO One*, 58(3).
- Rifna, E., Misra, N., & Dwivedi, M. (2023). Recent advances in extraction technologies for recovery of bioactive compounds derived from fruit and vegetable waste peels: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(6), 719-752.
- Sabaruddin, F. A., Megashah, L. N., Shazleen, S. S., & Ariffin, H. (2023). Emerging trends in the appliance of ultrasonic technology for valorization of agricultural residue into versatile products. *Ultrasonics sonochemistry*, 99, 106572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106572>
- Saqib, N. U., Sharma, H. B., Baroutian, S., Dubey, B., & Sarmah, A. K. (2019). Valorisation of food waste via hydrothermal carbonisation and techno-economic feasibility assessment. *Science of the Total Environment*, 690, 261-276.
- Shekhar, S., Prakash, P., Singha, P., Prasad, K., & Singh, S. K. (2023). Modeling and optimization of ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from *Allium sativum* leaves using response surface methodology and artificial neural network coupled with genetic algorithm. *Foods*, 12(9), 1925.
- Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., & Ren, X. (2023). A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined

- technologies. *Ultrasonics sonochemistry*, 101, 106646. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>
- Ślota, P., Harasym, J., & Jacukowicz-Sobala, I. (2025). Supercritical Fluid Extraction—A Sustainable and Selective Alternative for Tannin Recovery from Biomass Resources. *Applied Sciences*, 15(11), 5914.
- Somat, H. A., Thani, N. M., Mustapha, W. A. W., Lim, S. J., Seng, N. S. S., Rahman, H. A., Razali, N. S. M., Ali, M. M., & Kamal, S. M. M. (2025). Subcritical Water Extraction of Bioactive Compounds from Plant Materials: Recent Advances. *Journal of Future Foods*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.10.005>
- Subramani, V., Tomer, V., Balamurali, G., & Mansingh, P. (2025). Artificial neural network in optimization of bioactive compound extraction: recent trends and performance comparison with response surface methodology. *Analytical Sciences*, 41(2), 101-117.
- Tamayo-Vera, D., Mesbah, M., Zhang, Y., & Wang, X. (2025). Advanced machine learning for regional potato yield prediction: analysis of essential drivers. *npj Sustainable Agriculture*, 3(1), 12. <https://doi.org/10.1038/s44264-025-00052-6>
- Tiwari, B. K. (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100-109.
- Tlais, A. Z. A., Fiorino, G. M., Polo, A., Filannino, P., & Di Cagno, R. (2020). High-Value Compounds in Fruit, Vegetable and Cereal Byproducts: An Overview of Potential Sustainable Reuse and Exploitation. *Molecules*, 25(13). <https://doi.org/10.3390/molecules25132987>
- Tram, N. N., Hien, P. P., & Oanh, H. N. (2015). Optimizing the extraction conditions of phenolic compounds from fresh tea shoot. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 3(1-2), 106-110.
- Uca, E., & Güleç, H. A. (2024). Process Optimization for the Extraction of Phenolic Compounds from Pomegranate Peels: Response Surface Methodology-Desirability Function and Artificial Neural Network-Genetic Algorithm. *Akademik Gıda*, 22(1), 23-33.
- Upadhyay, S. K., Singh, G., Rani, N., Rajput, V. D., Seth, C. S., Dwivedi, P., Minkina, T., Wong, M. H., Show, P. L., & Khoo, K. S. (2024). Transforming bio-waste into value-added products mediated microbes for enhancing soil health and crop production: Perspective views on circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103573. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103573>
- Usman, I., Hussain, M., Imran, A., Afzaal, M., Saeed, F., Javed, M., Afzal, A., Ashfaq, I., Al Jbawi, E., & A. Saewan, S. (2022). Traditional and innovative approaches for the extraction of bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 1215-1233.
- Uwineza, P. A., & Waśkiewicz, A. (2020). Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials. *Molecules*, 25(17). <https://doi.org/10.3390/molecules25173847>
- Valencia-Hernandez, L. J., Wong-Paz, J. E., Ascacio-Valdés, J. A., Chávez-González, M. L., Contreras-Esquivel, J. C., & Aguilar, C. N. (2021). Procyanidins: From Agro-Industrial Waste to Food as Bioactive Molecules. *Foods*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/foods10123152>
- Vasquez, W. V., Hernández, D. M., del Hierro, J. N., Martín, D., Cano, M. P., & Fornari, T. (2021). Supercritical carbon dioxide extraction of oil and minor lipid compounds of cake byproduct from Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) beverage production. *The Journal of Supercritical Fluids*, 171, 105188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105188>
- Vinatoru, M., Mason, T., & Calinescu, I. (2017). Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97, 159-178.
- Wang, Q., Wang, X., Wang, X., & Ma, H. (2008). Glucoamylase production from food waste by *Aspergillus niger* under submerged fermentation. *Process Biochemistry*, 43(3), 280-286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.12.010>

- Yadav, S., Malik, K., Moore, J. M., Kamboj, B. R., Malik, S., Malik, V. K., Arya, S., Singh, K., Mahanta, S., & Bishnoi, D. K. (2024). Valorisation of Agri-Food Waste for Bioactive Compounds: Recent Trends and Future Sustainable Challenges. *Molecules*, 29(9). <https://doi.org/10.3390/molecules29092055>
- Yáñez-Cajo, D., Vásconez-Montúfar, G., Villamar-Torres, R. O., Godoy-Montiel, L., Jazayeri, S. M., Pérez-Porras, F., & Mesas-Carrascosa, F. (2025). Banana Yield Prediction Using Random Forest, Integrating Phenology Data, Soil Properties, Spectral Technology, and UAV Imagery in the Ecuadorian Littoral Region. *Sustainability*, 17(22), 10098.
- Yıldırım, M., Erşatır, M., Poyraz, S., Amangeldinova, M., Kudrina, N. O., & Terlets kaya, N. V. (2024). Green extraction of plant materials using supercritical CO₂: insights into methods, analysis, and bioactivity. *Plants*, 13(16), 2295.
- Žagar, T., Frlan, R., & Kočever Glavač, N. (2024). Using Subcritical Water to Obtain Polyphenol-Rich Extracts with Antimicrobial Properties. *Antibiotics (Basel)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/antibiotics13040334>
- Zhang, J., Wen, C., Zhang, H., Duan, Y., & Ma, H. (2020). Recent advances in the extraction of bioactive compounds with subcritical water: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 183-195.
- Zhang, M., & Mahdi, W. A. (2023). Development of SVM-based machine learning model for estimating lornoxicam solubility in supercritical solvent. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103268>

TOPRAK MİKROBİYOTASI VE AGROEKOSİSTEMLERDEKİ ROLÜ: SÜRDÜRÜLEBİLİR TARIM VE MİKROBİYAL YÖNETİM

Tülay Dizikisa*

GİRİŞ

Tarım sektörünün karşı karşıya bulunduğu en kritik sorunlardan biri, küresel ölçekte artan gıda talebini karşılarken aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği sağlamaktır. Nüfus artışının hızlanması, iklim değişikliğinin etkilerinin belirginleşmesi ve doğal kaynakların giderek azalması, tarımsal üretim sistemlerinin yeniden yapılandırılmasını zorunlu hale getirmektedir (Conacher, 2009; Stavi & Lal, 2015). Mevcut üretim modellerinde yaygın olarak kullanılan yoğun toprak işleme, monokültür uygulamalar ve kimyasal girdilere dayalı üretim stratejileri, kısa vadede verim artışı sağlasa da uzun vadede toprak sağlığını tehdit ederek ekosistem bütünlüğünü bozmakta; organik madde kaybı, toprak biyotasının azalması, erozyon ve su kirliliği gibi sorunlara yol açmaktadır. Bu değişimlerin küresel ölçekte oluşturduğu baskı, tarımsal sistemlerin sürdürülebilirliğini tehdit eden yapısal bir problem olarak giderek daha görünür hale gelmektedir (Paustian et al., 2016).

Bu nedenle toprak mikrobiyotasının korunması, desteklenmesi ve işlevsel çeşitliliğinin artırılması ekosistem işleyişiyle birlikte tarımsal verimlilik açısından da stratejik bir önem taşımaktadır. Toprak, biyolojik çeşitliliğin en yoğun bulunduğu doğal ortamlardan biri olup; bakteriler, mantarlar, aktinomisetler, protistler ve siyanobakteriler gibi geniş bir mikroorganizma topluluğunu barındırmaktadır. Bu mikroorganizmalar, karbon, azot ve fosfor gibi temel besin döngülerinin düzenlenmesi, organik madde ayrışımı, humus oluşumu, patojen baskılama, toprak yapısının agregasyon yoluyla stabilizasyonu

* Dr. Öğr. Üyesi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Ağrı, tdizikisa@agri.edu.tr, ORCID: orcid.org/ 0000-0001-9322-8159

ve bitkilerin besin alımının optimize edilmesi gibi kritik ekosistem hizmetlerini yerine getirir (Fierer, 2017; Schimel & Schaeffer, 2012). Özellikle rizosfer bölgesinde yoğunlaşan PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) ve siyanobakteriler; bitki büyümesini uyaran fitohormonlar üretmeleri, besin elementlerinin çözünübilirliğini artırmaları ve bitki patojenlerine karşı doğal bir koruma sağlamaları nedeniyle agroekosistemlerde biyolojik verimliliğin sürdürülmesinde merkezi bir role sahiptir (Glick, 1995; Harish et al., 2009; Hayat, Ahmed & Sheirdil, 2012).

Toprak mikrobiyotasının ekolojik işlevleri, yalnızca biyokimyasal süreçleri düzenlemekle sınırlı olmayıp, aynı zamanda çevresel değişimlere karşı sistemin dayanıklılık mekanizmalarının temel belirleyicisi olarak da önem kazanmaktadır. Mikrobiyal toplulukların dayanıklılığı ve uyum kapasitesi, çevresel stres koşullarında ekosistem fonksiyonlarının devamlılığını değerlendirmek açısından kritik parametrelerdir. Bu özellikler; ani iklim dalgalanmaları, su stresi, tuzluluk artışı veya kimyasallar gibi stres faktörleri altında toprak ekosistemlerinin işlevselliğini sürdürmesine olanak sağlayarak tarımsal üretkenliğin devamlılığını desteklemektedir (Çetinkaya, 2025).

Mikrobiyal toplulukların yapısını etkileyen faktörler oldukça çeşitlidir. Toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, iklim koşulları, bitki çeşitliliği ve kök salgıları gibi doğal etmenlerin yanı sıra tarımsal uygulamalar da mikrobiyal kompozisyon ve işlevsellik üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Yoğun pestisit uygulamaları ve kimyasal gübre kullanımı mikrobiyal dengeyi bozarak toprak sağlığını zayıflatabilirken organik gübreleme, azaltılmış toprak işleme, örtü bitkisi kullanımı ve ürün çeşitlendirme gibi sürdürülebilir tarım uygulamaları mikrobiyal çeşitliliği artırarak agroekosistemlerin dayanıklılığını güçlendirmektedir (Çakmakçı, 2005).

Bu nedenle özellikle PGPR ve siyanobakteriler gibi faydalı mikroorganizmaların biyogübre olarak kullanımı, kimyasal girdilere bağımlılığı azaltarak çevre ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir üretim modeline katkı sunmaktadır. Bu mikroorganizmalar, bitkilerle simbiyotik ilişkiler kurarak azot fiksasyonu gerçekleştirir, kök bölgesinde kolonizasyonu artırır ve toprakta biyokimyasal süreçlerin

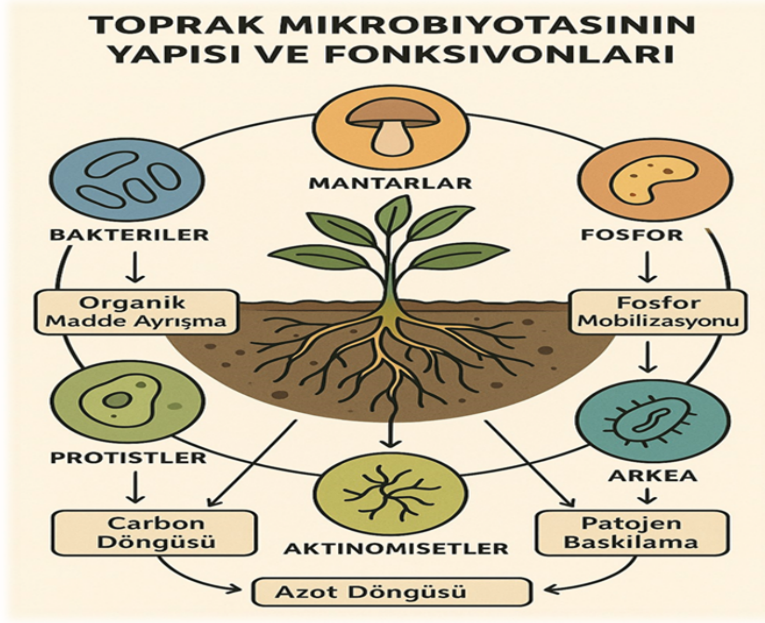
daha etkin yürütülmesini sağlar. Moleküler biyoloji ve genetik analiz teknolojilerindeki gelişmeler bu mikroorganizmaların çeşitliliğini, işlevsel genetik yapısını, çevresel streslere verdiği yanıtları ve kök çevresindeki etkileşim ağlarını daha detaylı incelemeyi mümkün kılmakta; böylece biyogübre uygulamalarının etkinliğini artıracak yeni biyoteknolojik yaklaşımlar ortaya çıkmaktadır (Küçük, 2019).

Tüm bu bilimsel ve pratik gereklilikler doğrultusunda hazırlanan bu kitap bölümü, toprak mikrobiyotasının agroekosistemlerdeki yapısal ve işlevsel önemini kapsamlı bir kuramsal çerçeveye ele almayı amaçlamaktadır. Bu bölüm kapsamında mikrobiyal çeşitlilik, rizosfer etkileşimleri, besin döngülerindeki mikrobiyal süreçler, mikrobiyal ağ yapılarının ekosistemin çok yönlü işleyişine katkısı ve çevresel stres koşullarında mikrobiyal adaptasyon mekanizmaları detaylı biçimde incelenecektir. Ayrıca biyogübrelerin rolü, mikrobiyom mühendisliği, sentetik mikrobiyal topluluklar (SynCom), metagenomik yaklaşımlar ve geleceğe yönelik araştırma perspektifleri değerlendirilerek akademik ve uygulamalı tarım açısından stratejik bir yol haritası sunan; sürdürülebilir tarımsal üretim hedeflerine ulaşmada toprak mikrobiyotasının taşıdığı potansiyeli bilimsel ve pratik düzeyde ortaya koyan bütüncül bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Toprak Mikrobiyotasının Yapısı ve Fonksiyonları

Toprak, fiziksel bir bitki yetiştirme ortamı olmanın çok ötesinde; biyolojik çeşitliliği, kimyasal bileşimi ve mikrohabitatlarıyla oldukça karmaşık, çok katmanlı ve dinamik bir ekosistemdir. Bu ekosistemin sürdürülebilir işleyişinin merkezinde, farklı taksonomik ve metabolik özelliklere sahip mikroorganizmaların oluşturduğu toprak mikrobiyotası yer almaktadır (van der Heijden, Bardgett, & van Straalen, 2008; Fierer, 2017). Toprak mikroorganizmaları; organik maddenin ayrışması, karbon ve azot döngülerinin düzenlenmesi, fosfor mobilizasyonu, patojen baskılama ve toprak yapısının stabilizasyonu gibi temel ekosistem işlevlerinin yürütülmesinde kritik roller üstlenir (Şekil 1). Mikrobiyal çeşitlilik ve fonksiyonel zenginlik, yalnızca bitki beslenmesini ve verimliliğini desteklemekle kalmayıp aynı zamanda çevresel streslere karşı ekosistem dayanıklılığını belirleyen biyolojik

bir tampon görevi görür (Schimel & Schaeffer, 2012; Berendsen, Pieterse, & Bakker, 2012).



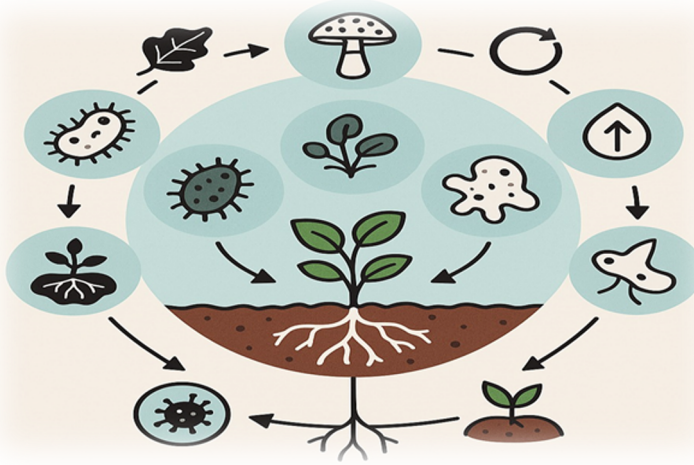
Şekil.1: Toprak mikrobiyotasının yapısı ve fonksiyonları

Mikrobiyal topluluk kompozisyonu

Toprak mikrobiyotası; bakteriler, mantarlar, arkea, aktinomisetler ve protistler gibi çok çeşitli mikroorganizma gruplarından oluşan kompleks bir topluluktur (Şekil 2). Bu topluluğun yapısı abiyotik ve biyotik çevresel faktörlerin etkileşimiyle şekillenir (Fierer, 2017). Toprak pH'sı, organik madde içeriği, nem, tekstür ve mineralojik yapı gibi fizikokimyasal özellikler mikrobiyal dağılımın temel belirleyicileridir. Bunun yanında bitki türü, rizosfer salgıları, kökün yapısı ve uygulanan tarımsal yönetim biçimleri mikrobiyal bileşimi doğrudan etkileyen biyotik unsurlardır (Lauber, Hamady, Knight, & Fierer, 2009).

Bakteriler genellikle rizosferde baskın olup hızlı metabolik yanıt verebilme özellikleriyle besin döngülerinin önemli bir kısmını yürütürken, mantarlar daha geniş hif ağlarıyla organik maddenin ayrışmasında ve bitki kökleriyle simbiyotik ilişkilerin kurulmasında

merkezi rol oynar (Parniske, 2008). Aktinomisetler, kurak ve organik maddece düşük topraklarda dayanıklılıkları ve antibiyotik üretim



Şekil.4: Mikrobiyal aktivite varlığı

kapasiteleri ile dikkat çeker; protistler ise bakteriyel popülasyonların düzenlenmesinde trofik kontrol mekanizmaları oluşturarak mikrobiyal topluluk dinamiklerinin sürekliliğine katkı sağlar (Geisen et al., 2018). Türkiye’de yürütülen çalışmalar, organik gübre ve kompost uygulamalarının, kimyasal girdilere kıyasla mikrobiyal çeşitliliği ve biyokütleyi önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Dağ, Mut & Erbaş Köse, 2024). Bu bulgular, toprak mikrobiyal kompozisyonunun sürdürülebilir tarım uygulamalarıyla doğrudan ilişkilendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Mikrobiyal fonksiyonel çeşitlilik

Toprak mikroorganizmalarının fonksiyonel çeşitliliği, ekosistem süreçlerinin istikrarını ve verimliliğini belirleyen biyokimyasal ve ekolojik rollerin geniş bir bölümünü kapsar. Bu işlevler arasında; karbon, azot ve fosfor döngülerinin regülasyonu, organik maddenin ayrışması, biyolojik azot fiksasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçlerinin yürütülmesi, fosfat çözünmesi, toprak enzimatik aktivitesinin sürdürülmesi ve bitki sağlığının desteklenmesi yer almaktadır (Schimel & Schaeffer, 2012; Hu et al., 2024).

Karbon döngüsünde selüloitik ve lignolitik mikroorganizmalar kompleks organik bileşikleri daha küçük moleküllere ayırarak humus oluşumuna zemin hazırlarken azot döngüsü *Rhizobium*, *Azotobacter* gibi azot fiksatorleri ve nitrifikasyon/denitrifikasyon süreçlerini yürüten uzmanlaşmış türler tarafından sürdürülür (Kuypers, Marchant, & Kartal, 2018). Fosfor döngüsünde, fosfat çözücü bakteriler ve özellikle arbusküler mikorizal mantarlar bitkiye alımı güç olan fosfor formlarının mobilizasyonunda belirleyicidir (Parniske, 2008; Gil Martínez et al., 2025).

Mikroorganizmalar ayrıca bitki sağlığını düzenleyen biyokimyasal savunma mekanizmalarını da tetikler. Aktinomisetlerin antibiyotik sentezi, rekabetçi bakterilerin siderofor üretimi ve bazı rizobakterilerin hormon düzenleyici bileşikler üretmesi kök bölgesinde patojen baskılanmasını destekleyerek bitki gelişimini teşvik eder (Berendsen, Pieterse, & Bakker, 2012). Literatürde organik tarım uygulamalarının mikrobiyal fonksiyonel zenginliği artırdığı; kompost, fermante organik gübre ve düşük toprak işleme yöntemlerinin enzimatik aktiviteyi güçlendirerek agroekosistemlerin dayanıklılığını yükselttiği vurgulanmaktadır (Altıkat & Çelik, 2009). Bu fonksiyonel çeşitlilik, sürdürülebilir tarım sistemlerinin biyolojik temeli olup çevresel streslere karşı ekosistem stabilitesinin korunmasında kritik bir role sahiptir (Dağ, Mut & Erbaş Köse, 2024; Gil Martínez et al., 2025).

Mikrobiyal aktivite ve toprak sağlığı

Toprak mikrobiyotasının sağlığı ve işlevselliği, mikrobiyal aktivitenin yoğunluğu ve çeşitliliği ile doğrudan ilişkilidir. Mikrobiyal aktivite, organik madde dönüşümü, besin döngüleri, patojen baskılama ve bitki besin alımı gibi temel ekosistem hizmetlerini şekillendirir (van der Heijden, Bardgett, & van Straalen, 2008; Fierer, 2017). Yüksek mikrobiyal çeşitlilik, toprak yapısının stabilizasyonunu, karbon depolamayı, erozyon kontrolünü, bitki sağlığını ve ekosistem istikrarını destekler. Organik tarım uygulamaları ise mikrobiyal biyokütleyi artırmak, enzimatik aktiviteleri yükseltmek, mikorizal kolonizasyonu güçlendirmek ve besin döngülerini hızlandırmak suretiyle toprak sağlığını sürdürülebilir biçimde iyileştirir (Altıkat & Çelik, 2009).

Enzimatik aktivite göstergeleri

Toprak enzimleri, mikrobiyal aktivitenin en doğrudan göstergelerinden biri olarak kabul edilmekte olup; karbon, azot ve fosfor döngülerindeki biyokimyasal süreçlerin etkinliğini ve hızını yansıtır (Dick, 2011). Bu enzimlerin aktiviteleri, toprağın besin döngülerindeki fonksiyonel kapasitesini belirlemekte kritik rol oynar ve toprak sağlığının göstergesi olarak kullanılabilir (Şekil 3). Örneğin:

Dehidrogenaz aktivitesi: Toprakta genel mikrobiyal metabolizmanın yoğunluğunu ve canlı mikrobiyal biyokütleyi yansıtır. Dehidrogenaz, mikrobiyal elektron transfer reaksiyonlarında rol oynar ve organik maddenin enerjiye dönüştürülme sürecini doğrudan gösterir (Alef & Nannipieri, 1995). Türkiye’deki çalışmalar, organik gübre ve düşük toprak işleme uygulamalarının dehidrogenaz ve fosfataz aktivitelerini artırarak mikrobiyal canlılığı desteklediğini göstermektedir (şekil.1) (Altıkat & Çelik, 2009).

Fosfataz aktivitesi: Fosforu alınabilir forma getiren rizobakteriler, düşük moleküler ağırlıklı organik asitler (sitrik asit, malik asit, glukonik asit, oksalik asit, laktik asit) salgılar ve organik fosforun inorganik forma dönüşmesini sağlayarak bitkiler tarafından alınabilir forma dönüştürür. Organik fosfor bileşiklerinin mineralizasyonu, bu bakteriler tarafından üretilen asidik ve alkali fosfatazlar ile fitaz enzimleri aracılığıyla gerçekleşir. Bakteriler yalnızca fosfor çözünürlüğünü artırmakla kalmaz aynı zamanda bitki büyümesini teşvik eden fitohormonlar üretir. Siderofor ve antibiyotik sentezi yoluyla rizosfer mikrobiyal dengesini düzenler ve bitki sağlığını olumlu yönde etkiler. (Chen et al., 2016; Çetinkaya, 2025).

Üreaz ve proteaz aktiviteleri: Azot döngüsünün kritik bileşenlerindendir. Üreaz, üreyi amonyağa dönüştürerek bitkilerin kullanabileceği formda azot sağlar. Proteazlar ise topraktaki organik proteinleri amino asitlere dönüştürerek mineralizasyonu destekler (Sinsabaugh et al., 2008).

Karbon döngüsü enzimleri: β -glukosidaz, lignaz ve peroksidaz gibi enzimler, kompleks organik maddelerin ayrışmasında görev alır. Bu enzimler selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi yapı taşlarının

parçalanmasını sağlayarak humus oluşumuna katkıda bulunur ve toprak karbon rezervlerinin korunmasına yardımcı olur.

Azot döngüsü mikroorganizmaları: Rhizobium türleri azot fiksasyonu, Nitrosomonas nitrifikasyon ve Pseudomonas denitrifikasyon süreçlerinde kritik roller üstlenir. Bu mikroorganizmaların aktivitesi, toprakta biyolojik azot döngüsünün sürekliliğini sağlar ve bitki besin döngüsünü doğrudan etkiler.

Fosfor mobilizasyonu: Fosfat çözündürücü bakteriler ve arbusküler mikorizal mantarlar, bitkiler için çözünür fosforun sağlanmasında anahtar rol oynar. Bu simbiyotik ilişkiler, bitkilerin fosfor alım kapasitesini artırırken toprak mikroekosisteminin işlevselliğini güçlendirir.



Şekil.3: Mikrobiyal enzimler ve besin döngüleri

PGPR etkisi ve patojen baskılama: Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler, fitohormon üretimi, siderofor sentezi ve stres toleransını artırıcı metabolitler aracılığıyla bitkilerin gelişimini destekler. İnorganik fosfatların çözünürlüğünü artıran ve demir alımını kolaylaştıran siderofor sentezi gibi doğrudan mekanizmalarla bitki metabolizmasını destekler. Ayrıca bazı mikroorganizmalar antibiyotik,

siderofor ve uçucu organik bileşik üretimi yoluyla patojenlerin çoğalmasını sınırlar ve kök bölgesinde koruyucu bir mikrokolojik denge sağlar. Bitkilerde PGPR'nin dağılımı ve çoğalması, ortamdaki farklı konsantrasyon koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Berendsen, Pieterse, & Bakker, 2012; Meraklı & Memon, 2020).

Toprak enzimlerinin bu çok yönlü işlevleri sadece mikrobiyal aktivitenin bir göstergesi olmakla kalmaz aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği açısından toprak sağlığının belirleyici parametrelerini ortaya koyar. Bu nedenle, farklı toprak yönetim stratejileri ve organik uygulamalar, enzim aktivitelerini artırarak toprağın fonksiyonel kapasitesini desteklemektedir (Altıkat & Çelik, 2009). Enzim aktiviteleri mevsimsel değişimlerden ve toprak neminden etkilenir; yağışlı dönemlerde aktiviteler artarken, kuraklık sürecinde sınırlanabilir (Fierer et al., 2003).

Toprak fiziksel ve kimyasal parametrelerle mikrobiyal aktivite ilişkisi

Mikrobiyal aktivite, toprak sağlığını belirleyen en önemli göstergelerden biri olmakla birlikte, toprak fiziksel ve kimyasal özellikleriyle sıkı bir ilişki içerisindedir (Karapire & Özgönen, 2013). Toprak pH'sı, mikrobiyal toplulukların kompozisyonunu ve metabolik etkinliğini doğrudan şekillendirir. Nötr veya hafif alkali pH değerlerinde bakteriyel aktivite artarken asidik ortamlar mantar topluluklarının baskın olduğu ekosistemler yaratır (Lauber, Hamady, Knight, & Fierer, 2009; Gil Martínez et al., 2025).

Toprak organik madde içeriği, mikroorganizmalar için temel besin kaynağıdır ve enzimatik aktiviteleri artırarak karbon ve azot döngülerinin verimliliğini destekler. Organik gübreleme, kompost uygulamaları ve yeşil gübre kullanımının, mikrobiyal biyokütleyi ve enzim aktivitelerini artırdığı ve böylece toprak sağlığını güçlendirdiği Türkiye'den yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Dizikisa, Yıldız& Uruç Parlak,2022 a,b).

Toprak nemi ve havalanma durumu da mikrobiyal aktiviteler üzerinde belirleyici rol oynar. Su doygunluğu yüksek olan topraklarda oksijen kısıtlılığı, aerobik mikrobiyal süreçleri sınırlandırırken, iyi havalanan topraklar enzimatik aktivitelerin ve besin dönüşüm

süreçlerinin daha etkin şekilde gerçekleşmesine olanak sağlar (Geisen et al., 2018).

Toprak tekstürü ve agregat yapısı, mikrobiyal toplulukların yaşam alanlarını ve işlevlerini belirler. Kumlu topraklar su tutma kapasitelerinin düşük olması nedeniyle mikrobiyal aktiviteyi sınırlar. Tınlı ve humusça zengin topraklar mikroorganizmalar için korunaklı mikrohabitatlar sunduğundan enzimatik aktiviteler ve karbon mineralizasyonu artar (van der Heijden, Bardgett, & van Straalen, 2008).

Mikrobiyal ağların karmaşıklığı da toprak fonksiyonlarının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Araştırmalar, mikrobiyal ağ yapısının toplam mikrobiyal çeşitlilikten bağımsız olarak ekosistem işlevlerini açıklamada kritik rol oynayabileceğini göstermektedir (Wagg et al., 2019; Fernández-González et al., 2020; Karimi et al., 2019). Organik gübreleme, toprak agregasyonunu artırarak makro ve mikroagregat yapılarının oluşumunu teşvik eder. Makroagregatlar kolay parçalanabilir karbon ve besin kaynakları sunmasına rağmen mikroagregatlar dirençli karbon birikimi sağlayarak oligotrofik mikroorganizmalar için uygun ortam oluşturur (Elliott, 1986; Trivedi et al., 2015).

Sonuç olarak, toprak fiziksel ve kimyasal parametrelerinin uygun hale getirilmesi mikrobiyal aktiviteyi ve enzimatik süreçleri artırarak karbon, azot ve fosfor döngülerinin etkinliğini yükseltir. Bu durum, toprak ekosistemlerinin sağlığı ve sürdürülebilir tarımsal üretim kapasitesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Fierer, 2017; Dağ, Mut & Erbaş Köse, 2024).

Organik Tarım Uygulamaları ve Mikrobiyal Destekleyici Stratejiler

Organik gübre ve kompost kullanımı

Çevre dostu ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına olan ilgi giderek artmaktadır (Kavino et al., 2007; Saravanakumar & Samiyappan, 2007; Hayat, Ahmed & Sheirdil, 2012). Etkili mikroorganizmalar içeren biyogübreler ve biyopestisitler, sentetik gübreler, insektisitler ve pestisitlere kıyasla bitki büyümesini çeşitli mekanizmalarla

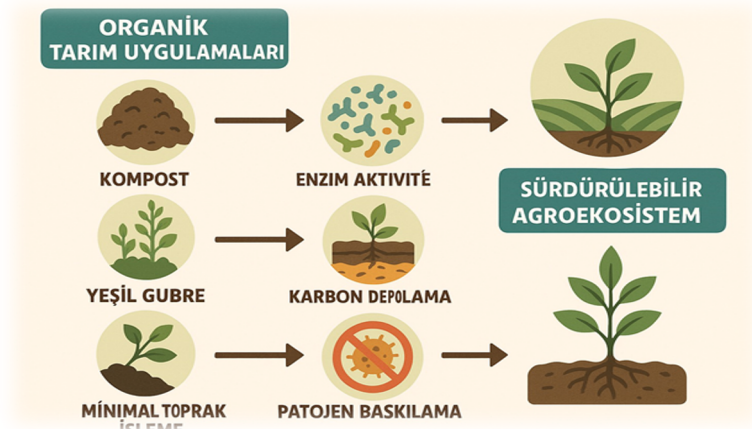
destekleyerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar ve tarımsal verimliliği artırır (Şekil 4). Toprak ekosistemlerinde faydalı mikrobiyal etkileşimler, karmaşık organik maddelerin daha basit ve bitkiler tarafından alınabilir azot formlarına dönüşümünü ve bitki büyümesi ile verimliliğinin düzenlenmesini sağlayarak temel çevresel süreçlerin kontrolünde kritik rol oynar (Barea, Pozo, Azcón, & Azcón-Aguilar, 2005).

Yeşil gübre ve bitki rotasyonu

Yeşil gübre bitkileri, toprak yapısını iyileştirme ve mikrobiyal çeşitliliği artırma potansiyeline sahiptir. Leguminosae familyasından bitkiler, azot fiksasyonu yoluyla toprağa besin elementi sağlar ve *Rhizobium* gibi simbiyotik bakterilerin aktivitesini artırır (Kuypers, Marchant, & Kartal, 2018; Çengel, Okur & Yılmaz, 2009). Bitki rotasyonu ise toprak patojenlerini baskılayarak mikrobiyal çeşitliliği destekler ve organik tarım sistemlerinde ekosistem dayanıklılığını güçlendirir.

Minimal toprak işleme ve No-Till yaklaşımları

Aşırı toprak işleme, mikrobiyal habitatları bozarak organik madde kaybına yol açabilir. Minimal toprak işleme ve no-till uygulamaları, mikrobiyal biyokütleyi korur, agregat stabilitesini destekler ve topraktaki karbon stoklarını artırır (Shimada, Mise, Morino, & Otsuka, 2024; Monti et al., 2021). Türkiye’de yapılan araştırmalar, permakültür benzeri no-dig sistemlerde mikrobiyal biyokütle ve organik karbonun konvansiyonel tarıma göre daha yüksek olduğunu göstermektedir (Dağ, Mut & Erbaş Köse, 2024).



Şekil.4: Toprak mikrobiyotasını destekleyici stratejiler

Mikrobiyal inkübasyon ve biyolojik gübreler

Toprak mikrobiyotası, doğrudan mikrobiyal inokülasyon ile optimize edilebilir. Azot fiksatorler, fosfat çözündürücüler ve faydalı mantarlar ile yapılan inokülasyonlar, bitki besin alımını artırır ve toprak patojenlerini baskılar (Bender, Wagg, & van der Heijden, 2016; Ornik, Salinas, Antonacci, Schädler & Azarbad, 2024). Türkiye’deki çalışmalar, bu biyolojik gübrelerin organik tarım sistemlerinde toprak sağlığını ve bitki büyümesini desteklediğini göstermektedir (Khatri, Dubey, Shivay, Jelsbak & Sharma, 2023).

Moleküler ve metagenomik yaklaşımlar ile izleme

Toprak mikrobiyotasının fonksiyonel durumunu ve çeşitliliğini izlemek için moleküler ve metagenomik teknikler giderek önem kazanmaktadır. Geleneksel kültür tabanlı yöntemler, topraktaki mikroorganizmaların yalnızca küçük bir kısmını izole edebildiğinden sınırlıdır; oysa metagenomik analizler, doğrudan toprak DNA’sını kullanarak kültüre alınamayan mikroorganizmaları da kapsamlı bir şekilde inceleme imkânı sunar (Shimada, Mise, Morino, & Otsuka, 2024).

Başlıca metagenomik yaklaşımlar şunlardır:

16S rRNA ve ITS dizilemesi: Bakteri ve mantar topluluklarının taksonomik çeşitliliğini ve yapısını belirlemeye yarar.

Shotgun metagenomik dizileme: Topraktaki tüm genetik materyali analiz ederek mikroorganizmaların fonksiyonel potansiyelini ve metabolik yollarını ortaya çıkarır.

Metatranskriptomik analiz: Mikrobiyal genlerin aktif olarak hangi koşullarda ifade edildiğini gösterir; enzim üretimi ve besin dönüşümü aktivitelerini doğrudan takip etmeye olanak sağlar.

Metaproteomik ve metabolomik yaklaşımlar: Toprak mikrobiyotasının protein ve metabolit üretimini inceleyerek ekosistem işlevlerini fonksiyonel düzeyde değerlendirir.

Organik tarımda bu yaklaşımlar, farklı toprak yönetim stratejilerinin mikrobiyal topluluklar üzerindeki etkilerini hassas bir şekilde değerlendirmeye olanak tanır. Örneğin, organik gübre uygulamaları veya minimal toprak işleme sistemlerinin hangi mikroorganizma gruplarını desteklediği, hangi enzimatik aktiviteleri artırdığı veya patojen baskılamayı nasıl etkilediği metagenomik verilerle izlenebilir. Bu bilgiler, sürdürülebilir tarım sistemlerinde toprak sağlığını optimize etmek ve bitki büyümesini artırmak için stratejik kararların bilimsel temelini sağlar.

Toprak Mikrobiyotasının Ekosistem Sağlığı ve Biyolojik Verimlilikteki Rolü

Toprak mikrobiyotasının aktivitesi, agroekosistemlerde biyolojik verimlilik ve ekosistem sağlığının temel belirleyicilerindendir. Mikrobiyal topluluklar, organik maddeyi mineralize ederek bitkilerin erişebileceği besin formlarını sağlar ve azot, fosfor ile diğer makro ve mikro besin elementlerinin döngüsünü düzenler (Fierer, 2017; Parniske, 2008). Bu süreçler yalnızca bitki büyümesini desteklemekle kalmaz; toprak yapısının stabilizasyonuna, su tutma kapasitesinin artmasına ve patojen baskılanmasına katkıda bulunur (Berendsen, Pieterse, & Bakker, 2012; Bender, Wagg, & van der Heijden, 2016).

Organik tarım uygulamaları, düşük kimyasal girdi ve yüksek organik madde yönetimi sayesinde mikrobiyal biyokütleyi ve işlevsel çeşitliliği artırarak verimlilik üzerinde doğrudan etki gösterir. Türkiye’de yapılan çalışmalar, organik gübre ve kompost uygulamalarının toprak enzim aktivitelerini (ör. β -glukozidaz, dehidrogenaz) yükselttiğini ve mikrobiyal toplulukların toparlanma kapasitesini artırdığını göstermektedir (Erdel, Şimşek, & Kesimci, 2023; Sivojienė et al., 2024).

Aktif mikrobiyal topluluklar, karbon ve azot döngülerinin dengelenmesine katkı sağlayarak sera gazı emisyonlarını azaltabilir ve toprak organik karbon stoklarını artırabilir (Hu et al., 2024; Kuypers, Marchant, & Kartal, 2018). Stres geçmişine sahip toprak mikrobiyotası, çevresel değişimlere karşı sistemin direnç ve plastisite özelliklerini güçlendirir. Örneğin, organik tarımda yetiştirilen buğday fidanlarında stres geçmişi olan bakteriler, bitki büyümesini destekleyerek biyolojik verimliliği artırmıştır (Ornik, Salinas, Antonacci, Schädler & Azarbad, 2024).

Permakültür ve no-till uygulamalar gibi ileri agroekosistem tasarımları, mikrobiyal biyokütle ve çeşitliliği artırarak hem toprağın biyolojik kapasitesini hem de ekosistem fonksiyonlarını güçlendirir (Monti et al., 2021).

Mikrobiyom Mühendisliği ve Sentetik Mikrobiyal Topluluklar

Sentetik mikrobiyal topluluklar (SynCom’lar), farklı mikroorganizma türlerini bir araya getirerek işlevsel uyum ve sinerji yaratmayı hedefler. Bu topluluklar, bitkileri patojenlere karşı korumanın yanı sıra toprak işlevselliğini (karbon, azot ve fosfor döngüleri) artırmaktadır. Stabilize edilmiş SynCom modelleri, laboratuvar ve ekosistem benzeri cihazlarda (EcoFAB) yeniden canlandırılabilir; bu sistemler mikrobiyal etkileşimlerin anlaşılmasında ve potansiyel biyogübrelerin optimize edilmesinde önemli bir araçtır (Yin, Hagerty & Paulitz, 2022; Fonseca-García et al., 2024).

Saha uygulamaları, SynCom’ların laboratuvar bulgularının pratik tarım sistemlerine taşınabileceğini göstermektedir. Örneğin, sorghum bitkisine uygulanan SynCom’lar hem bitki büyümesini artırmış hem de

toprakta enzimatik aktivite, karbon ve besin döngüsü gibi çok işlevli hizmetleri güçlendirmiştir.

Moleküler ve metagenomik analizler, mikrobiyal toplulukların yapısını ve işlevselliğini hassas bir şekilde izlemekte kritik bir rol oynar. Tam genom dizileme ve metagenomik yaklaşımlar, toprak mikroorganizmalarının biyofilm kurma, dayanıklılık ve besin dönüşüm yeteneklerini detaylı şekilde ortaya koyabilir (Fadiji & Babalola, 2020). Türkiye’de de metagenomik yöntemler, biyogübrenin toprak mikrobiyotasına etkilerini inceleyen çalışmalarla yaygınlaşmaktadır (Yıldız et al., 2024).

Ulusal stratejiler ve politika bağlamında, mikrobiyal gübreler sürdürülebilir tarımın merkezinde yer almakta; Tarım ve Orman Bakanlığı ve araştırma enstitüleri, bu ürünlerin ekosistem sağlığı ve tarımsal verim üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir (TÜBİTAK Yeşil Büyüme Yol Haritası, 2023).

Gelecekte, SynCom tasarımları laboratuvar-saha uyumlu hâle getirilecek, yerel mikrobiyota temelli biyogübre formülasyonları geliştirilecek ve metagenomik veriler yapay zekâ ile entegre edilerek veri odaklı tarım stratejilerine yön verecektir. Polikültür ve agroekolojik entegrasyon ile mikrobiyal optimizasyon birleştirilerek daha dirençli ve verimli sistemler oluşturulacaktır.

Toprak mikrobiyotası, çevresel değişimlere karşı gösterdiği dayanıklılık (robustluk) ve uyum sağlama yeteneği (plastisite) sayesinde, agroekosistemlerin ne kadar dirençli olduğunu anlamamızda önemli bir göstergedir. Mikrobiyom mühendisliği ve sentetik mikrobiyal topluluklar ise organik tarım sistemlerinde hem bitki verimliliğini hem de toprak sağlığını artırmak için etkili ve stratejik araçlar olarak öne çıkmaktadır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Toprak mikrobiyotası, agroekosistemlerin biyolojik verimliliği, toprak sağlığı ve sürdürülebilirliği açısından merkezi bir rol oynamaktadır. Mikrobiyal topluluklar, organik maddeleri mineralize ederek bitkilerin erişebileceği besin formlarını sağlar, azot, fosfor ve diğer makro ile mikro besin elementlerinin döngüsünü düzenler ve

patojen baskılama mekanizmalarıyla ekosistemi korur. Bu süreçler, yalnızca bitki büyümesini desteklemekle kalmaz; aynı zamanda toprak yapısının stabilizasyonuna, su tutma kapasitesinin artmasına, karbon stoklarının korunmasına ve enerji akışının optimize edilmesine katkıda bulunur. Organik tarım uygulamaları, biyolojik gübreleme, kompost, yeşil gübre ve minimal toprak işleme gibi bütüncül stratejiler, mikrobiyal biyokütleyi ve fonksiyonel çeşitliliği artırarak bu ekosistem hizmetlerini güçlendirmekte, enzimatik aktiviteleri yükseltmekte ve mikrobiyal toplulukların toparlanma kapasitesini desteklemektedir.

Moleküler ve metagenomik yaklaşımlar, toprak mikrobiyotasının yapısını, dayanıklılık ve plastisite özelliklerini hassas bir şekilde ortaya koyarak agroekosistemlerin çevresel değişimlere karşı tepkilerini anlamada kritik araçlar sunmaktadır. 16S rRNA ve ITS dizileme, tam genom ve metagenomik analizler, mikrobiyom mühendisliği ve sentetik mikrobiyal toplulukların tasarımında stratejik bir temel oluşturmaktadır. Saha çalışmalarında Sentetik Mikrobiyal Topluluklar (SynCom'lar) ve yerel mikrobiyota temelli biyogübre uygulamaları, bitki büyümesini artırmakta, toprak çok işlevliliğini ve enzimatik aktiviteleri güçlendirmekte, karbon ve besin döngülerini desteklemektedir. Metagenomik analizler, laboratuvar ve saha koşulları arasında köprü kurarak biyogübrelerin mikrobiyal topluluk kompozisyonu ve işlevsel gen dağılımları üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Gelecekte veri odaklı yaklaşımlar, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile metagenomik verilerin tarımsal karar destek sistemlerine entegrasyonu, polikültür ve agroekolojik entegrasyon stratejileri ile birleştirilerek organik tarım sistemlerinin daha dirençli, verimli ve sürdürülebilir hâle gelmesini sağlayacaktır. Toprak mikrobiyotasının yönetimi ve optimize edilmesi, organik madde yönetimi, mikrobiyal inokülasyon, mikrobiyom mühendisliği ve modern moleküler yaklaşımların entegre kullanımı, yalnızca bitkisel verimliliği artırmakla kalmayıp, ekosistem fonksiyonlarını güçlendirmekte ve agroekosistemlerin çevresel değişimlere karşı dayanıklılığını yükseltmektedir. Bu bağlamda, mikrobiyal toplulukların bilinçli yönetimi, organik tarım ve sürdürülebilir tarım sistemlerinin başarısında temel bir stratejik unsur olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

- Alef, K., & Nannipieri, P. (Eds.). (1995). Enzyme activities. In *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (pp. 311–373). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012513840-6/50022-7>
- Altukat, S., & Çelik, A. (2009). Toprak işleme sistemlerinin önemli bazı toprak kalite kriterlerine olan etkileri. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 16(1), 33–41. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/26269>
- Barea, J. M., Pozo, M. J., Azcón, R., & Azcón-Aguilar, C. (2005). Microbial co-operation in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 56(417), 1761–1778. <https://www.jstor.org/stable/24031435>
- Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil community functioning. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(6), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Chen, W., Yang, F., Zhang, L., & Wang, J. (2016). Organic acid secretion and phosphate solubilizing efficiency of *Pseudomonas* sp. PSB12: Effects of phosphorus forms and carbon sources. *Geomicrobiology Journal*, 33(10), 870–877. <https://doi.org/10.1080/01490451.2015.1123329>
- Conacher, A. (2009). Land degradation: A global perspective. *New Zealand Geographer*, 65(2), 91–94. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7939.2009.01151.x>
- Çakmakçı, R. (2005). Bitki gelişimini teşvik eden rizobakterilerin tarımda kullanımı. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 36(1), 97–107. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ataunizfd/issue/2937/40658>
- Çengel, M., Okur, N., & Yılmaz, F. İ. (2009). Organik Bağ Topraklarında Yeşil Gübre Bitkileri ve Çiftlik Gübresi Uygulamalarının Topraktaki Mikrobiyal Aktiviteye Etkileri. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 46(1), 25–31. https://dergipark.org.tr/tr/pub/zfdergi/issue/5093/69569#article_cite
- Çetinkaya, D. (2025). Topraktaki yararlı bakterilerin bitki gelişimini desteklemedeki rolü. In *Akademik perspektiften ziraat, orman ve su ürünleri* (pp. 21–40). YAZ Yayınları. <https://www.researchgate.net/publication/393357376>
- Dağ, F., Mut, Z., & Erbaş Köse, Ö. D. (2024). Farklı lokasyonlarda yetiştirilen mısır mikrobiyal gübre uygulamasının etkisi: I. Verim ve verim unsurları. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 8(1), 72–80. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10813331>
- Dick, R. P. (2011). *Methods of soil enzymology*. Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9>
- Dizikisa, T., Yıldız, N., & Uruç Parlak, K. (2022 a). Ağrı-Eleşkirt yöresi tarım topraklarına vermikompost ilavesinin mısır bitkisinde gelişme ve makro besin elementi içeriğine etkisi. *Ordu University Journal of Science and Technology*, 12(2), 131–140. <https://doi.org/10.54370/ordubtd.1091828>
- Dizikisa, T., Yıldız, N., & Uruç Parlak, K. (2022b). Ağrı-Eleşkirt yöresi tarım topraklarına vermikompost ilavesinin mısır bitkisinin mikro besin elementi ve toksik ağır metal içeriği üzerine etkisi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 11(2), 197–205. <https://doi.org/10.29278/azd.1099743>
- Elliott, E. T. (1986). Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 627–633. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>
- Erdel, E., Şimşek, U., & Kesimci, T. G. (2023). Effects of fungi on soil organic carbon and soil enzyme activity under agricultural and pasture land of Eastern Türkiye. *Sustainability*, 15(3), 1765. <https://doi.org/10.3390/su15031765>
- Fadiji, A. E., & Babalola, O. O. (2020). Metagenomics methods for the study of plant-associated microbial communities: a review. *Journal of microbiological methods*, 170, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2020.105860>
- Fernández-González, A. J., Cardoni, M., Gómez-Lama Cabanás, C., Valverde-Corredor, A., Villadas, P. J., Fernández-López, M., & Mercado-Blanco, J. (2020). Linking belowground

- microbial network changes to different tolerance level towards Verticillium wilt of olive. *Microbiome*, 8(1), 11. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s40168-020-0787-2.pdf>
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. <https://www.nature.com/articles/nrmicro.2017.87>
- Fierer, N., Allen, A. S., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2003). Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. *Global Change Biology*, 9(9), 1322–1332. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1046/j.1365-2486.2003.00663.x>
- Fonseca-García, C., et al. (2024). Synthetic microbial communities enhance sorghum growth under field conditions. *Frontiers in Plant Science*, 15, 110234. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.110234>
- Geisen, S., Mitchell, E. A. D., Adl, S., Bonkowski, M., Dunthorn, M., ... Lara, E. (2018). Soil protists: A fertile frontier in soil biology research. *FEMS Microbiology Reviews*, 42(3), 293–323. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy006>
- Gil-Martínez, M., Madejón, P., Madejón, E., & de Sosa, L. L. (2025). Compost and vegetation drive soil fertility, microbial activity and community in organic agricultural soils. *Plant and Soil*, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07720-z>
- Glick, B. R. (1995). The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 41(2), 109–117. <https://doi.org/10.1139/m95-015>
- Hayat, R., Ahmed, I., & Sheirdil, R. A. (2012). An overview of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture. *Crop production for agricultural improvement*, 557–579.
- Harish, S., Kavino, M., Kumar, N., Balasubramanian, P., & Samiyappan, R. (2009). Induction of defense-related proteins by mixtures of plant growth promoting endophytic bacteria against Banana bunchy top virus. *Biological Control*, 51(1), 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.06.002>
- Hu, Y., et al. (2024). Soil microbial contributions to carbon and nitrogen cycling under changing climates. *Global Change Biology*, 30(2), 400–417. <https://doi.org/10.1111/gcb.16789>
- Karapire, M., & Özgönen, H. (2013). Doğada yararlı mikroorganizmalar arasındaki etkileşimler ve tarımsal üretimde önemi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 6(2), 149–157. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/417868>
- Karimi, B., Dequiedt, S., Terrat, S., Jolivet, C., Arrouays, D., Wincker, P., Cruaud, C., Bispo, A., Chemidlin Prévost-Bouré, N., & Ranjard, L. (2019). Biogeography of soil bacterial networks along a gradient of cropping intensity. *Scientific Reports*, 9(1), 3812. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40422-y>
- Kavino, M., Harish, S., Kumar, N., Saravanakumar, D., Damodaran, T., Soorianathasundaram, K., & Samiyappan, R. (2007). Rhizosphere and endophytic bacteria for induction of systemic resistance of banana plantlets against bunchy top virus. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(5), 1087–1098. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(06\)00526-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(06)00526-8)
- Khatrı, S., Dubey, S., Shivay, Y. S., Jelsbak, L., & Sharma, S. (2023). Organic farming induces changes in bacterial community and disease suppressiveness against fungal phytopathogens. *Applied Soil Ecology*, 181, 104658. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104658>
- Küçük, Ç. (2019). Bitki probiyotik bakteriler: Bitkiler üzerindeki rolleri ve uygulamalar. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 2(1), 1–15. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijlsb/issue/43277/492415>
- Kuypers, M. M. M., Marchant, H. K., & Kartal, B. (2018). The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16, 263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
- Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2009). Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(15), 5111–5120. <https://doi.org/10.1128/AEM.00335-09>
- Monti, M., Badagliacca, G., Romeo, M., & Gelsomino, A. (2021). No-till and solid digestate amendment selectively affect the potential denitrification activity in two Mediterranean orchard soils. *Soil Systems*, 5(2), 31. <https://www.mdpi.com/2571-8789/5/2/31>
- Meraklı, N., & Memon, A. (2020). Role of plant growth promoting bacteria (PGPR) in plant growth and development: Soil-plant relationship. *Turkish Journal of Agriculture - Food*

- Science and Technology, 8(12), 2590–2602. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i12.2590-2602.3785>
- Ornik, M., Salinas, M., Antonacci, M., Schädler, M., & Azarbad, H. (2024). Stress history in soil microbiomes enhances wheat growth in organic systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 182, 108003. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.108003>
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49–57. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27078564/>
- Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: The mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6, 763–775. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>
- Saravanakumar, D., & Samiyappan, R. (2007). ACC deaminase from *Pseudomonas fluorescens* mediated saline resistance in groundnut (*Arachis hypogea*) plants. *Journal of Applied Microbiology*, 102(5), 1283–1292. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17448163/>
- Schimel, J. P., & Schaeffer, S. M. (2012). Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in Microbiology*, 3, 348. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00348>
- Shimada, T., Mise, K., Morino, K., & Otsuka, S. (2024). Simple measures to capture the robustness and the plasticity of soil microbial communities. *arXiv*, 2409.03372. <https://arxiv.org/pdf/2409.03372>
- Sinsabaugh, R. L., et al. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*, 11(11), 1252–1264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
- Sivojenė, A., et al. (2024). Organic fertilization enhances soil microbial recovery and enzyme activity. *Applied Soil Ecology*, 180, 104883. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.104883>
- Stavi, I., & Lal, R. (2015). Achieving zero net land degradation: Challenges and opportunities. *Journal of Arid Environments*, 112, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.03.002>
- Trivedi, P., Rochester, I. J., Trivedi, C., Van Nostrand, J. D., Zhou, J., Karunaratne, S., & Singh, B. K. (2015). Soil aggregate size mediates the impacts of cropping regimes on soil carbon and microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 91, 169–181. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071715003120>
- TÜBİTAK. (2023). Yeşil büyüme yol haritası: Sustainable agriculture and microbial fertilizers strategy report. Ankara: TÜBİTAK. https://tubitak.gov.tr/sites/default/files/2023-12/yesilbuyume_tyh_rapor_19072023.pdf
- van der Heijden, M. G., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296–310. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>
- Wagg, C., Schlaeppli, K., Banerjee, S., Kuramae, E. E., & van der Heijden, M. G. (2019). Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning. *Nature communications*, 10(1), 4841. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-12798-y.pdf>
- Yıldız, A., Başpınar, U. F., Sapaz, D., Peker, O., Keskin, E., & Yazıcı, K. (2024). Biyogübreinin toprak mikrobiyotasına etkisinin belirlenmesinde metagenomik analizin önemi (Özet bildirisi). Ulusal Çay Kongresi, Rize, Türkiye, 21–23 Mayıs 2024. <https://cayihtisas.erdogan.edu.tr/Files/ckFiles/cayihtisas-erdogan-edu-tr/Ulusal%20%C3%87ay%20Kongresi%20%C3%96zet%20Bildiri%20Kitab%C4%B1.pdf>
- Yin, C., Hagerty, C. H., & Paulitz, T. C. (2022). Synthetic microbial consortia derived from rhizosphere soil protect wheat against a soilborne fungal pathogen. *Frontiers in Microbiology*, 13, 908981. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.908981>

TOPRAKTAKİ BÜYÜK HAZİNE: MİKROORGANİZMA KONSORSİYUMLARININ TIBBİ AROMATİK BİTKİLERDE SÜRDÜRÜLEBİLİR YETİŞTİRİCİLİKTEKİ ROLÜ*

Meral Kutlu**, Yaşar Ertürk***

GİRİŞ

Tıbbi ve aromatik bitkiler dünya genelinde geleneksel ve modern tıp uygulamalarında kritik bir rol üstlenmektedir. Bu bitkiler, doğal olarak sentezledikleri sekonder metabolitler sayesinde farmasötik, kozmetik ve gıda endüstrileri için yüksek katma değer sunan biyolojik bileşenler üretmektedir (Tiring, Satar & Özkaya, 2021). Dünya Sağlık Örgütü verileri, gelişmekte olan ülkelerde nüfusun %80 den fazlasının sağlık hizmetlerinde bitki bazlı tedavilere başvurduğunu göstermektedir (Sen et al., 2015; WHO, 2023). Bu durum, tıbbi ve tıbbi aromatik bitkilerin, kültürel gelenekler açısından olduğu kadar, tıbbi açıdan da sürdürülebilir bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu geniş tıbbi ve kültürel temelin yanında, tıbbi aromatik bitkilerin ticari değeri de giderek artmaktadır.

Tıbbi ve aromatik bitkilerin küresel önemi

Uçucu yağlar, flavonoidler ve alkaloid gibi biyolojik olarak aktif bileşenlerin geniş kullanım alanı, söz konusu bitkilerin ekonomik önemini güçlendirmektedir. Örneğin lavanta (*Lavandula* spp.) uçucu yağları, antimikrobiyal ve sedatif özellikleri nedeniyle dünya çapında yüksek bir pazar talebine sahiptir (Cavanagh & Wilkinson, 2002; Ghelardini et al., 1999). Bu durum, tıbbi aromatik bitkilerin sağlık sektöründe olduğu kadar, ekonomi ve endüstride de stratejik bir kaynak haline geldiğini göstermektedir.

** Dr. Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Erzurum, meralktl@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-3288-1266

*** Prof.Dr. Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Kırşehir, yasar.erturk@ahievran.edu.tr, ORCID: orcid.org/0000-0003-2525-0260

Küresel ticaret dinamikleri incelendiğinde, tıbbi ve tıbbi aromatik bitkilerin üretimi, işlenmesi ve ticarileştirilmesinin hızla arttığı görülmektedir. Biyolojik çeşitlilik açısından zengin bir coğrafyaya sahip olan Türkiye, kekik ve lavanta gibi türlerin yoğun üretimi sayesinde yerel pazar ihtiyaçlarını karşılamakta ve uluslararası pazarda güçlü bir ihracat hacmi elde ederek önemli bir ekonomik değer de yaratmaktadır (Pakdemirli, 2020). Bunun yanı sıra, kontrollü kültür tekniklerinin yaygınlaşması doğal popülasyonların korunmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir üretim modellerini desteklemektedir (Çiçek, 2021).

Tıbbi aromatik ve tıbbi bitkilerin sağlık açısından taşıdığı önem de dikkate değerdir; birçok tür güçlü antimikrobiyal, antioksidan ve biyolojik olarak aktif diğer özelliklere sahiptir. Bu nitelikler, söz konusu bitkileri farmasötik ve nutrasötik uygulamalar için vazgeçilmez bileşenler haline getirmektedir (Çelik & Ayran, 2020). Tüm bu unsurlar bir arada değerlendirildiğinde, tıbbi ve aromatik bitkilerin ekolojik, ekonomik ve sağlık temelli rolleriyle küresel ölçekte stratejik bir biyolojik kaynak olarak önem kazandığı anlaşılmaktadır.

Kimyasal girdilerin çevresel etkileri

Konvansiyonel tarım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kimyasal gübreler ve pestisitler kısa vadede üretim artışı sağlama kapasitesine sahip olmakla birlikte, uzun vadeli ekosistem işleyişi üzerinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır (Tilman et al., 2002, Zhang et al., 2017). Özellikle nitrat ve fosfat temelli gübrelerin kontrolsüz uygulamaları, yeraltı sularında kimyasal yük birikimine neden olmakta, toprak asitlenmesini hızlandırmakta ve mikrobiyal toplulukların kompozisyonunu önemli ölçüde değiştirmektedir (Singh et al., 2019). Bu süreçler, sürdürülebilir tarımsal üretimin ve tıbbi aromatik bitki yetiştiriciliğinin uzun vadeli istikrarını tehdit eden kritik ekolojik riskler ortaya çıkarmaktadır (şekil 1).

Kimyasal Girdilerin Çevresel Etkileri



Şekil 1: Kimyasal girdilerin çevreye görünmez maliyetleri

Azotlu gübrelerin toprak profilinde aşırı düzeyde bulunması, yeraltı ve yüzey sularında nitrat birikimini artırarak ötrofikasyon süreçlerini tetiklemekte; bunun sonucunda sucul ekosistemlerde çözünmüş oksijenin önemli seviyede azalması ve biyolojik çeşitliliğin gerilemesi gözlenmektedir (Khan, 2024). Azotun ekosistem genelinde aşırı döngüsü, yalnızca toprak pH dinamiklerini olumsuz etkilemez, aynı zamanda özellikle diazot oksit (N_2O) emisyonları üzerinden küresel sera gazı yükünü artıran bir mekanizma olarak etkili olmaktadır (Bai et al., 2020). Pestisit kullanımına ilişkin bulgular da benzer bir ekolojik baskıyı işaret etmektedir. Geniş spektrumlu pestisitlerin uygulanması, toprak mikrobiyal topluluklarında belirgin bir fonksiyonel ve yapısal daralmaya yol açarak bakteri sayısı ile çeşitliliğinin azalmasına neden olmaktadır (Meena et al., 2020). Bu tür mikrobiyal bozulmalar, besin döngülerinin sürekliliğini zayıflatmakta ve uzun vadeli toprak verimliliğinde ölçülebilir düşüşler yaratmaktadır (Muñoz Bautista et al., 2025). Çoklu pestisit kombinasyonlarının kullanımı, mikrobiyal işlevselliğin daha kapsamlı bir biçimde baskılanmasına yol açarak ekosistem süreçlerini daha da kırılgan hale getirmektedir (Ni et al., 2025). Bunun yanı sıra pestisitlerin çevresel birikimi, yalnızca mikrobiyal düzeyi değil, sucul organizmaların fizyolojisini ve toprak

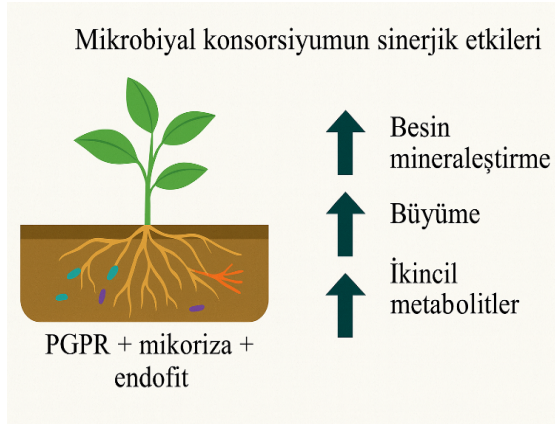
ekosistemlerinin bütüncül dayanıklılığını da tehdit eden geniş ölçekli bir çevresel stres faktörü oluşturmaktadır (Swaine et al., 2025).

Bu kapsamlı ekolojik ve biyokimyasal etkiler göz önüne alındığında, tıbbi aromatik bitki üretim sistemlerinde kimyasal girdilere bağımlılığı azaltmayı hedefleyen biyolojik tabanlı yaklaşımlar giderek daha stratejik bir önem kazanmaktadır. Mikrobiyal gübreleme teknolojileri, biyolojik mücadele uygulamaları ve entegre zararlı yönetimi (IPM=Integrated Pest Management) çerçevesinde geliştirilen yöntemler, toprak sağlığını destekleyen, ekosistem fonksiyonlarını yeniden yapılandıran ve sürdürülebilir üretim modellerinin temelini oluşturan bilimsel olarak geçerli alternatifler sunmaktadır. Bu yaklaşımlar, kimyasal girdilerin uzun vadeli ekolojik maliyetlerini azaltırken tıbbi aromatik bitki üretiminde daha dirençli ve ekolojik olarak uyumlu bir üretim anlayışının inşasına katkı sağlamaktadır.

Mikroorganizma konsorsiyumlarının yeni nesil biyoteknolojik yaklaşım olarak önemi

Toprak mikroorganizmaları, bitkilerle kurdukları simbiyotik ya da yarı simbiyotik ilişkiler aracılığıyla besin mineralizasyonu, stres toleransı ve sekonder metabolit üretimi üzerinde belirleyici etkiler oluşturmaktadır (Bhattacharyya & Jha, 2012). Bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR=Plant Growth Promoting Rhizobacteria), mikorizal mantarlar ve endofitik bakterilerden oluşan çok bileşenli mikrobiyal konsorsiyumlar, tekil mikroorganizma inokülasyonlarına kıyasla daha kapsamlı, karmaşık ve işlevsel olarak üstün etkileşim ağları sağlamaktadır. Bu konsorsiyumlar, bitki gen ekspresyonunu teşvik eden sinyal iletim süreçlerini etkileyerek hem fizyolojik hem de moleküler düzeyde metabolik optimizasyon sağlar; kök mimarisini yeniden şekillendirir ve uçucu yağ bileşimlerinin miktar ve kalite özelliklerini iyileştirir (Compant et al., 2019). Ayrıca konsorsiyumların bitki stres sinyal yollarını aktive ederek antioksidan savunma sistemlerini güçlendirdiği ve sekonder metabolit sentez kapasitesini artırdığı gösterilmiştir (Ertürk et.al. 2022; Ahmad et al., 2022; Lin et al., 2022).

Yeni nesil biyoteknolojik yaklaşımlarda mikrobiyal konsorsiyumların tasarımı, omik teknolojiler (metagenomik, transkriptomik, metabolomik ve proteomik) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu teknolojik entegrasyon, toprak mikrobiyomunun yapısal ve fonksiyonel bileşenlerinin yüksek çözünürlükle karakterize edilmesine olanak tanımakta, böylece konsorsiyum içindeki sinerjik etkileşimlerin düzenlenmesine zemin hazırlamaktadır (Timofeeva et al., 2023). Özellikle su kısıtı gibi abiyotik stres koşullarında, bu konsorsiyumlar su alım kapasitesini artıran fizyolojik adaptasyonları tetiklemekte; fotosentetik performansın sürdürülmesini sağlamakta ve reaktif oksijen türleri ile prolin gibi stres metabolitlerinin düzenlenmesi yoluyla bitki dayanıklılığını kayda değer düzeyde artırmaktadır (Saleem et al., 2021). Bunun yanı sıra mikrobiyal konsorsiyumlarla etkileşime giren bitkilerde fenolik bileşikler, flavonoidler ve diğer biyolojik olarak aktif sekonder metabolitlerde anlamlı düzeyde artışlar rapor edilmiştir (Jakubowska & Gośliński, 2025; Suriani et al., 2025). Bu fitokimyasal birikimler yalnızca bitkilerin savunma ve adaptasyon süreçlerini desteklemekle kalmamakta, aynı zamanda yüksek değerli uçucu yağların ve diğer biyoteknolojik olarak önemli bileşiklerin üretimini de teşvik etmektedir (şekil 2).



Şekil 2: Kök mikrobiyal konsorsiyumlarının besin mineralizasyonu, bitki büyümesi ve ikincil metabolit üretimi üzerindeki sinerjik etkileri

Genel olarak değerlendirildiğinde, mikroorganizma konsorsiyumlarının biyoteknolojik kullanımı sürdürülebilir tarım

çerçevesinde verim artışı ve stres toleransı sağlamakla sınırlı değildir; aynı zamanda bitkilerin sekonder metabolit profillerini zenginleştirme kapasitesiyle yüksek katma değerli biyo-fabrikasyon süreçlerine yeni bir yön vermektedir. Bu yaklaşım, klasik tek suş bazlı inokülasyon stratejilerinin ötesine geçen, özellikle tıbbi aromatik bitkiler için stratejik önemde bir biyoteknolojik paradigma sunmaktadır (Ertürk vd., 2022).

Mikroorganizmalar her ne kadar doğrudan gözle görülemese de kök ekosistemi içerisinde işleyen son derece karmaşık, dinamik ve ince ayarlı bir etkileşim ağı oluştururlar. Bu nedenle “hazine” söylemi, bu mikro ekosistemin bilimsel değerinin yanında kavramsal önemini de etkili bir biçimde yansıtır. Rizosfere yerleşen bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler (PGPR), mikorizal mantarlar ve endofitik mikroorganizmalar, bitki metabolizmasını adeta “arka planda” yönlendirerek besin döngüsünü düzenler, stres toleransını artırır ve sekonder metabolit üretimini düzenler. Bu mikroorganizmaların oluşturduğu sinerjik etkileşimler, bitkinin büyüme performansını artırmanın ötesinde savunma sistemlerinin aktivasyonunu da güçlendirir (Schmidt et al., 2014; Poudel et al., 2021; Ertürk et al., 2022). Özellikle mikorizal mantarlar, tuzluluk ve kuraklık gibi abiyotik stres koşullarında mineral alımını ve su taşınımını iyileştirerek bitkilerin fizyolojik dayanıklılığını belirgin biçimde artırmaktadır (Wahab et al., 2023). Öte yandan PGPR’ların indüklediği sistemik direnç, fitohormonlar, sidroforler ve savunma genlerinin düzenlenmesine dayalı geniş kapsamlı bir biyokimyasal yanıt dizisini içerir. Bu mikroorganizmalar aynı zamanda sekonder metabolit üretimi ve salgılanması üzerinde de kritik bir düzenleyici etkiye sahiptir: bitkiler, uçucu organik bileşikler, fenolikler ve flavonoidler gibi kök ekzometabolitleri aracılığıyla mikrobiyal toplulukları “şekillendirirken”, mikrobiyotaya bu sinyallere yanıt vererek bitkinin metabolik profiline doğrudan nüfuz eder (Pang & Chen, 2021). Böylece bu büyük hazine, bitki fizyolojisinin merkezinde yer alan çok katmanlı bir biyolojik etkileşim yumağını temsil eder.

Bu bölümün amacı, tıbbi aromatik bitkilerde mikroorganizma konsorsiyumlarının biyolojik ve biyoteknolojik temellerini bütüncül bir çerçevede inceleyerek, bu konsorsiyumların bitki fizyolojisi,

metabolizması ve tarımsal üretim süreçleri üzerindeki çok yönlü etkilerini sistematik biçimde ortaya koymaktır. Mikroorganizmaların tıbbi aromatik bitkilerle kurduğu karşılıklı etkileşimlerin büyüme dinamikleri, besin döngüsü, sekonder metabolit üretimi ve stres toleransı bağlamında nasıl stratejik roller üstlendiği güncel literatür ışığında tartışılacaktır. Ayrıca, söz konusu mikro ekosistemlerin sürdürülebilir tarım uygulamalarındaki potansiyel katkıları kuramsal ve uygulamalı yönleriyle ele alınacaktır.

Bu kapsam doğrultusunda bölüm aşağıdaki ana başlıklar altında yapılandırılmıştır:

1. Mikroorganizma konsorsiyumlarının temel mekanizmaları ile PGPR, mikoriza ve endofitlerin tıbbi aromatik bitkilerde üstlendiği fonksiyonel roller.
2. Konsorsiyumların tekil mikroorganizmalara göre sunduğu avantajlar, sinerjik etkileşimlerin biyolojik temelleri ve performans farklılıkları.
3. Tıbbi aromatik bitkilerde metabolit yollarının işleyişi ve bu metabolik süreçler üzerinde mikroorganizmaların düzenleyici etkileri.
4. Bitki büyümesi, biyokütle verimi, uçucu yağ kalitesi ve fitokimyasal içerik üzerinde konsorsiyum kaynaklı metabolik ve fizyolojik değişimler.
5. Biyoteknolojik yaklaşımlar, sürdürülebilir tarım perspektifi, uygulama örnekleri, gelişen teknolojik eğilimler ve çevresel etkiler.

Bu kapsamlı perspektif, tıbbi aromatik bitkilerin kök bölgesinde yer alan ve “topraktaki büyük hazine” olarak nitelendirilebilecek mikroorganizma topluluklarının çok boyutlu bilimsel ve pratik önemini değerlendirmeyi sağlar. Böylelikle bölüm, kapsamlı bir teorik değerlendirme sunmanın yanında uygulamaya yönelik güncel yaklaşımları içeren analitik bir yol haritası oluşturur

Mikroorganizma konsorsiyumlarının temelleri

Tıbbi aromatik bitkilerin üretiminde verim ve kalite artışı, yalnızca bitkinin genetik yapısına bağlı değildir; toprak ekosistemi bu sürecin görünmez fakat belirleyici bir bileşenidir. Bitki kökleri, rizosfere yerleşmiş mikrobiyal topluluklarla kurdukları karşılıklı etkileşimler sayesinde besin alımı, metabolik aktivite ve stres toleransı bakımından güçlü bir biyolojik destek alır. Bu bağlamda PGPR'lar, mikorizal mantarlar ve endofitik mikroorganizmaların birlikte oluşturduğu konsorsiyumlar, tekil mikroorganizma uygulamalarına göre çok daha etkili, dayanıklı ve fonksiyonel açıdan geniş kapsamlı bir etkileşim ağı ortaya koyar (Bhattacharyya & Jha, 2012; Compant et al., 2019). Bu bölümde konsorsiyumların biyolojik temelleri, işleyiş mekanizmaları ve tıbbi aromatik bitkilerdeki işlevsel çıktıları ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.

PGPR, mikoriza ve endofitlerin rolü

PGPR'lar rizosferde aktif olarak bitki büyümesini teşvik eden bakterilerdir ve indol-3-asetik asit (IAA) ile sitokinin gibi fitohormonların üretimi sayesinde kök ve sürgün gelişimini doğrudan destekler (Glick, 2012; Ertürk et. al, 2011,2012). Ayrıca azot fiksasyonu, fosfat çözündürme ve organik asit üretimi gibi besin mineralizasyonu süreçleri aracılığıyla temel besinlerin bitki tarafından kullanılabilirliğini artırır. Bu mekanizmalar özellikle düşük besin içerikli topraklarda bitkisel performansın sürdürülmesinde belirleyici bir role sahiptir.

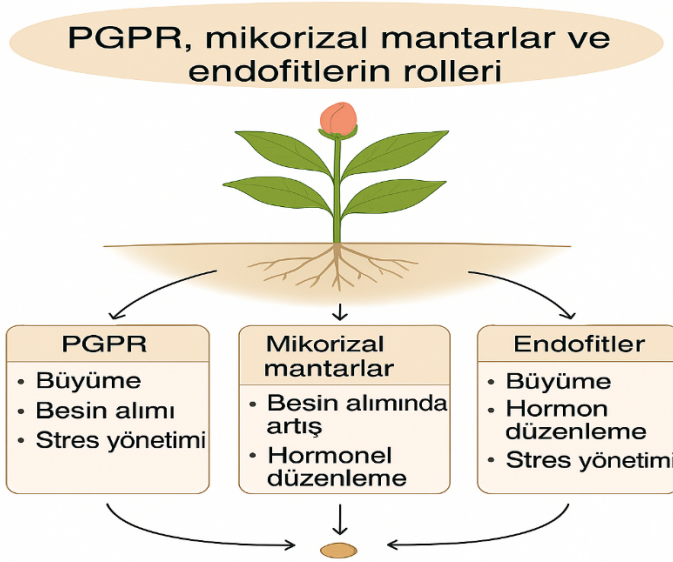
Mikorizal mantarlar ise bitki kökleriyle kurdukları mutualist ilişki yoluyla fosfor alımını, su taşınımını ve mineral dinamiklerini iyileştirir. Arbusküler mikorizal mantarların oluşturduğu ince hif ağları, kökün ulaşamadığı bölgelerdeki besinleri bitkiye aktarırken, tıbbi aromatik bitkilerde uçucu yağ sentezinin ve metabolik çeşitliliğin artmasına katkı sağlar (Smith & Read, 2008; Hardoim et al., 2015).

Endofitik mikroorganizmalar bitki dokuları içerisinde yaşayarak bitkinin fizyolojik süreçlerine doğrudan etki eder. Sekonder metabolit yollarını düzenleyerek fenolik, flavonoid ve terpenoid profilini zenginleştirir; böylece bitkinin tıbbi aromatik ve endüstriyel değerini artırır (Hardoim et al., 2015). Bu üç mikroorganizma grubu birlikte,

bitkinin biyolojik kapasitesini çok katmanlı biçimde optimize eden bir mikro ekolojik ağ oluşturur (şekil 3).

Konsorsiyumların tekli mikroorganizmalara karşı avantajı

Tekil mikroorganizma uygulamaları belirli bir mekanizma üzerinden sınırlı fayda üretirken, mikrobiyal konsorsiyumlar çok mekanizmalı, çok katmanlı ve yüksek dayanıklılığa sahip bir etkileşim modeli sunar. Farklı mikroorganizmaların birbirini tamamlayan özellikleri sayesinde besin dinamikleri, stres yanıtları, metabolit üretimi ve rizosfer stabilitesi eş zamanlı biçimde iyileşir (Compant et al., 2019; Foster et al., 2017). Örneğin PGPR–mikoriza birlikteliği, kök gelişimi ve fosfor alımı üzerinde sinerjik bir artış sağlarken endofitik bakteriler de metabolit üretimini düzenleyerek tıbbi aromatik kaliteyi yükseltir. Bu çoklu etkileşim mekanizması, tek bir mikroorganizmanın sağlayabileceğinden çok daha kapsamlı ve sürdürülebilir fizyolojik çıktılar oluşturur.



Şekil.3: PGPR, mikorizal mantarlar ve endofitlerin rolleri

Bitki gelişimini uyarıcı mekanizmalar

Mikrobiyal konsorsiyumların bitki gelişimine etkisi yalnızca kök veya sürgün büyümesi ile sınırlı değildir. Saçak kök oluşumunun artması, yaprak alanının genişlemesi ve biyokütlenin yükselmesi,

fotosentetik kapasitenin iyileştirilmesini sağlar. Bu fizyolojik düzenlemeler, özellikle tıbbi aromatik bitkilerde uçucu yağ sentezi ve yüksek değerli sekonder metabolitlerin üretiminde kayda değer bir artışa yol açar (Abou et al., 2025). Ayrıca besin kullanım etkinliğinin optimize edilmesi, bitkilerin çevresel stres koşullarına karşı daha yüksek dayanıklılık göstermesine imkân sağlar (Francioli et al., 2025)

Besin mineralizasyonu ve sekonder metabolitler

Konsorsiyumlar azot fiksasyonu, fosfor ve potasyum çözündürme, organik asit ve amino asit üretimi gibi biyokimyasal süreçler aracılığıyla bitkinin besin durumunu belirgin biçimde iyileştirir. Bu besin zenginleşmesi, tıbbi aromatik bitkilerde sekonder metabolit yollarının aktivasyonunu artırarak uçucu yağ, fenolik bileşikler ve alkaloid üretiminde yükselişe neden olur (Crusciol et al., 2024; Ali, et al., 2024). Böylece mikroorganizmalar, bitkinin kimyasal değerini artıran hem biyokimyasal hem ekolojik bir düzenleme mekanizması işlevi görür.

Stres toleransı

Topraktaki bu hazine, bitkilerin çevresel streslere karşı geliştirdiği savunma yanıtlarında merkezi bir konuma sahiptir. Mikrobiyal konsorsiyumlar sayesinde bitkiler tuz stresi altında osmatik koruyucular üretir, kuraklık koşullarında kök derinliğini ve su alım kapasitesini artırır, ağır metal toksisitesine karşı antioksidan sistemlerini harekete geçirir. Bu çok yönlü stres toleransı mekanizmaları, tıbbi aromatik bitkilerin hem verim hem de kalite açısından daha istikrarlı bir üretim performansı sergilemesini sağlar (Vurukonda et al., 2016).

Tıbbi aromatik bitkilerde mikrobiyal etkileşimlerin biyokimyasal temelleri

Tıbbi aromatik bitkilerin kimyasal profili yalnızca genetik yapılarından değil, rizosferdeki mikroorganizmaların etkisinden de büyük ölçüde etkilenir. Toprak mikroorganizmaları bitki metabolizmasını düzenleyerek sekonder metabolit üretimini artırır, savunma kapasitelerini güçlendirir ve uçucu yağ bileşimini optimize

eder. Bu bölümde, bu kompleks etkileşimlerin biyokimyasal mekanizmaları detaylı biçimde incelenmektedir.

Sekonder metabolit üretim yolları

Tıbbi aromatik bitkiler, terpenler, fenolik bileşikler ve alkaloidler gibi kimyasal açıdan zengin metabolitler sentezler. Bu bileşikler biyolojik savunmada ve endüstriyel değer açısından da kritik önem taşır (Lv, Wang & Zhang, 2024).

- **Terpenler:** Uçucu yağların temel bileşenlerini oluşturur. Mikrobiyal etmenlerle, özellikle PGPR ve mikorizal mantarlarla etkileşim, terpen biyosentezinin düzenlenmesine katkı sağlar; böylece mentol, linalool ve benzeri monoterpen bileşenlerin konsantrasyonları artış gösterir (Wu, Wu & Wang, 2023; Chou et al., 2023).
- **Fenolik bileşikler:** Antioksidan ve antimikrobiyal işlevlere sahiptir. Endofitik ve rizosferik mikroorganizmalar, fenolik yolağı üzerindeki enzim ekspresyonlarını artırarak flavonoid ve tanen düzeylerinin yükselmesine katkı sağlar (Ham et al., 2022; Ogbe, Gupta & van Staden, 2023).

Alkaloidler: Azot içerikli metabolitlerdir ve genellikle bitkinin savunma tepkilerinde rol oynar. Mikrobiyal konsorsiyumlar, öncül metabolitlerin biyosentetik akışını düzenleyerek alkaloid içeriğinin artmasına neden olabilir (Ng et al., 2024).

Mikroorganizmaların metabolit yollarını düzenleme mekanizmaları

Mikroorganizmalar, tıbbi aromatik bitkilerde sekonder metabolit biyosentez yollarını üç temel mekanizma aracılığıyla yeniden yapılandırır:

1. **Gen ekspresyonunun modülasyonu:** Toprak mikroorganizmaları bitki hücrelerine sinyal molekülleri (örneğin hormon benzeri bileşikler veya elisitörler) salarak, uçucu yağ ve fenolik bileşikler sentezleyen anahtar enzimlerin gen ekspresyonunu artırır. Bu süreç, bitkide ilgili transkripsiyon faktörlerinin uyarılması ve metabolik yolların

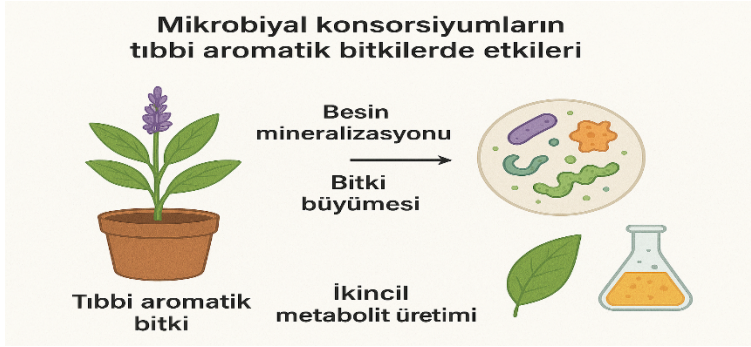
yeniden programlanmasıyla gerçekleşir (Aréchiga & Rosa, 2004; Rangel & Campos, 2019).

2. **Öncül maddeleri üretiminin teşviki:** Bazı mikroorganizmalar doğrudan amino asitler, izoprenoid öncülleri veya şekerler gibi sekonder metabolit öncüllerini tedarik eder ya da bitkinin kendi öncül madde sentez mekanizmalarını aktive eder. Bu şekilde, bitki tarafından kullanılan temel yapı taşlarının bolluğumiktarı artar ve sekonder metabolit üretimi desteklenir (Rangel & Campos, 2019; Khalid & Ullah, 2023).
3. **Enzimatik aktivasyon:** PGPR ve endofit mikroorganizmalar, bitki içindeki metabolik enzimlerin aktivitesini artıran faktörler üretebilir; bu da sekonder bileşiklerin biyosentetik hızını yükseltir. Özellikle fenolik ve terpen yolağı enzimlerinde gözlenen artış, metabolit birikimini anlamlı ölçüde yükseltir (Moneim & Alariqi, 2025).

Bu mekanizmalar aracılığıyla mikroorganizmalar, tıbbi aromatik bitkilerde biyokimyasal profili yeniden yapılandırarak hem metabolik yoğunluğu hem de adaptif faydayı artırır.

Metabolit üretiminin tarımsal ve ticari önemi

Mikroorganizmaların bu biyokimyasal etkileri, tıbbi aromatik bitkilerin uçucu yağ veriminde ve fenolik içeriklerinde ciddi artışlar sağlar. Örneğin, *Lavandula* spp ve *Mentha* spp gibi bitkilerde PGPR + mikoriza konsorsiyumları kullanıldığında, uçucu yağ içeriğinde %30–60 artış gözlemlenmiştir (Kapoor, Freitas & Puri, 2002; Rangel & Campos, 2019).). Bu durum bitki sağlığını ve aynı zamanda tıbbi ve tıbbi aromatik ürünlerin ekonomik değerini de yükseltir (şekil 4).



Şekil.4: Mikrobiyal konsorsiyumların tıbbi aromatik bitkilerde etkileri

Mikrobiyal konsorsiyumların tıbbi aromatik bitkiler üzerindeki ekofizyolojik etkileri

İncelenen çalışmalar, mikrobiyal konsorsiyum uygulamalarının tıbbi aromatik bitkilerde kapsamlı ekofizyolojik dönüşümler tetikleyebileceğine işaret eder. Örneğin, bir çalışmada kişniş (*Coriandrum sativum*) üzerinde rizobakteri ve mikorizal mantarların kombine kullanımı önemli ölçüde verim artışı ve uçucu yağ içeriği sağlamıştır (Aréchiga & Rosa, 2004). Ayrıca, tatlı fesleğen (*Ocimum basilicum*) popülasyonlarında gerçekleştirilen bakteri konsorsiyumu uygulamaları, bitki yüksekliği, kuru bitki verimi ve uçucu yağ oranında belirgin bir artış göstermiştir (Ortiz & Albacete, 2006). Bu tür mikrobiyal topluluklar yalnızca biyokütleyi yükseltmekle kalmayıp uçucu yağ bileşimini değiştirir, sekonder metabolit dağılımını artırır ve bitkinin stres koşullarına karşı direncini güçlendirir. Bu etkiler tıbbi aromatik bitki üretiminde hem sürdürülebilir tarım hem de yüksek katma değerli ürün potansiyeli perspektifi açısından büyük önem taşır. Mevcut teorik ve uygulamalı veri ışığında, biyo-gübre ya da biyostimülan formülasyonlarının geliştirilmesi, açık saha denemelerinin yaygınlaştırılması ve uzun dönemde mikrobiyal etki ve ekolojik sonuçların izlenmesi, araştırma öncelikleri arasında yer almalıdır.

Lavanta (*Lavandula* spp.)

Lavanta, özellikle *Lavandula angustifolia*, uçucu yağ bileşiminde ticari önemi olan bir model türdür. Kontrollü koşullardaki deneylerde arbusküler mikorizal mantarlarla PGPR'lerin oluşturduğu

konsorsiyum, biyokütleyi yaklaşık %25–30 oranında artırmış; uçucu yağ içeriğini ise %1,2'den %1,8'e yükseltmiştir (Dojima & Craker, 2018). Bu sonuçlar konsorsiyumun tek mikroorganizma inokülasyonuna kıyasla metabolik yönlendirme kapasitesinin daha yüksek olduğunu ve sekonder metabolit yollarını daha etkili biçimde yeniden düzenlediğini ortaya koyar.

Nane (*Mentha spp.*)

Nane türlerinde uçucu yağ verimi ve mentol/menton oranı mikrobiyal uygulamalara karşı son derece duyarlıdır. *Mentha piperita* üzerinde yapılan PGPR bazlı konsorsiyum çalışması, mentol oranını %45'ten %63'e yükseltmiş; uçucu yağ verimini 0,9 g/bitkiden 1,4 g/bitkiye taşımıştır (Khalid & Ullah, 2023). Bu artışın stres koşulları altında dahi korunması, mikrobiyal nüfustaki stabilize edici mekanizmaların rizosferde güçlü biçimde çalıştığına işaret eder.

Kekik ve Adaçayı (*Thymus spp.*, *Salvia spp.*)

Kekik ve adaçayı, fenolik bileşik zenginliği ve yüksek fitokimyasal değeriyle dikkat çeker. Bir çalışmada, kimyasal gübre uygulamasına kıyasla mikrobiyal konsorsiyum içerikli biyogübre kullanımı uçucu yağ verimini %35 oranında artırmış; toplam fenolik içeriği 110 mg/g'dan 160 mg/g'a yükseltmiştir (Abd-Allah, 2020, Rangel & Campos, 2019; Moneim & Alariqi, 2025). Bu bulgular, mikrobiyal konsorsiyumların fenilpropanoid metabolizmasını aktive ederek antioksidan kapasiteyi ve uçucu yağ sentezini eş zamanlı olarak modüle ettiğini gösterir.

Reyhan, Biberiye, Melisa (*Ocimum basilicum*, *Rosmarinus officinalis*, *Melissa officinalis*)

Bu türlerde mikrobiyal konsorsiyum uygulamaları, klorofil sentezini, antioksidan potansiyeli ve uçucu yağ üretimini artıran çok boyutlu fizyolojik tepkiler oluşturur. Örneğin, biyogübreleme çalışmaları Reyhan ve Melisa bitkilerinde toplam fenolik ve flavonoid içeriğini %20–30 oranında yukarı taşımış; uçucu yağ oranını kontrol grubuna kıyasla %25–40 aralığında artırmıştır (Golijan & Marković, 2019). Bu veriler, rizosfer mikroorganizmalarının terpenoid ve polifenol biyosentez yollarını düzenleyerek metabolik akışı olumlu yönde etkilediğini doğrular.

Özet olarak bu örnek çalışmalar, tıbbi aromatik bitkilerde mikroorganizma konsorsiyumlarının:

- Biyokütle ve verimi artırdığı,
- Uçucu yağ miktarı ve bileşimini optimize ettiği,
- Fenolik ve flavonoid içerik ile antioksidan kapasiteyi yükselttiği,
- koşullarında metabolik ve fizyolojik dayanıklılığı artırdığı gerçek verilerle ortaya konulmuştur.

Mikrobiyal konsorsiyumlar ve tıbbi aromatik bitkilerde biyoteknolojik uygulamalar

Mikrobiyal formülasyon geliştirme

Mikrobiyal formülasyonlar, bitki büyümesini destekleyen farklı mikroorganizma gruplarının (PGPR, mikoriza, endofitler) sinerjik kombinasyonlarını içerir. Bu konsorsiyumlar, yalnızca biyokütle ve verimi artırmakla kalmayıp uçucu yağ ve fenolik bileşik üretimini optimize ederek tıbbi aromatik bitkilerde yüksek katma değerli üretim sağlar (Dojima & Craker, 2018; Golijan & Marković, 2019).

Formülasyon uygulamaları üç ana kategoride ele alınabilir:

- *Biyogübreler*: Toprağa eklenen faydalı mikroorganizmalar, bitkilerin besin alımını artırır ve toprak mikrobiyomunu destekler (Badalingappanavar et al., 2018).
- *Biyostimülanlar*: Stres koşullarında bitki metabolizmasını aktive ederek fizyolojik dayanıklılığı güçlendirir (Tariyal, Ansari & Prasad, 2020).
- *Konsorsiyum stabilizasyon teknikleri*: Formülasyonların raf ömrünü ve arazi performansını optimize ederek uzun dönemli etkinliği garanti eder.

Omik teknolojileri ve moleküler düzeyli analizler

Modern biyoteknolojide, omik yaklaşımları mikrobiyal konsorsiyumların tıbbi aromatik bitkiler üzerindeki moleküler etkilerini çözümlenmekte kritik öneme sahiptir. Bunların bazıları;

- *Metagenomik analizler*: Rizosfer ve toprak mikrobiotasının çeşitliliğini ve fonksiyonel potansiyelini ortaya çıkarır (Dojima & Craker, 2018).

- *Metabolomik yaklaşımlar:* Uçucu yağ ve sekonder metabolit profillerindeki mikrobiyal uygulama öncesi ve sonrası değişiklikleri detaylandırır (Kutlu et al., 2019; Nurgül Kıtır Şen & Duran, 2021).
- *Transkriptomik yöntemler:* Mikroorganizmaların bitki gen ekspresyonunu yeniden programlayarak metabolik yolları nasıl yönlendirdiğini ortaya koyar.
- *Fenotipleme teknolojileri:* Konsorsiyum uygulamalarının fenotipik etkilerini nicel ve objektif biçimde değerlendirir (Golijan & Marković, 2019).

Tıbbi aromatik bitkilerde mikrobiyal konsorsiyumların uçucu yağ profili, sekonder metabolit üretimi ve stres toleransı üzerindeki etkilerini somutlaştıran çalışmalar literatürde ön plana çıkmaktadır. *Origanum onites* üzerine yapılan araştırmalarda, Kutlu et al. (2019) PGPR ve mikorizal konsorsiyum uygulamalarının biyokütle, uçucu yağ oranı ve bileşiminde anlamlı iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Benzer şekilde, tıbbi aromatik bitkilerde mikrobiyal konsorsiyumlarla yapılan biyo-gübre ve formülasyon uygulamalarına ilişkin literatürde, PGPR, AMF ve *Trichoderma* kombinasyonlarının bitkilerin stres toleransını artırdığı ve metabolik adaptasyonu desteklediği bildirilmektedir. Ertürk et al., (2022) Bu bağlamda, farklı abiyotik ve biyotik koşullarda uygulanan mikrobiyal inokulantların bitkilerin adaptasyon kabiliyetini artırdığı ve verim ile kalite parametrelerinde olumlu etkiler oluşturduğu görülmektedir. Bu bulguların birleştirilmesi, mikrobiyal konsorsiyumların *Origanum onites* üzerindeki çok boyutlu etkilerini doğrular ve uçucu yağ üretimi, fenolik bileşik içerik, biyokütle artışı ile stres toleransını kapsayan geniş bir biyoteknolojik potansiyeli açığa çıkarır.

Bu sonuçlar, mikrobiyal konsorsiyumların tıbbi aromatik bitki üretiminde stratejik önemini vurgular; dolayısıyla biyoteknolojik yaklaşımlar, bu etkileri maksimuma çıkarmak için kritik bir araç olarak öne çıkar. Formülasyon geliştirme, konsorsiyum stabilizasyonu ve omik teknolojilerinin entegrasyonu, verim, kalite ve metabolik optimizasyonu sağlayan kapsamlı bir strateji oluşturur. Böylelikle, mikrobiyal konsorsiyumların tıbbi aromatik bitkilerde biyokütle, uçucu

yağ, sekonder metabolit üretimi ve stres toleransı üzerindeki çok boyutlu etkileri sistematik bir biçimde ortaya konarak sürdürülebilir ve yüksek katma değerli üretim potansiyeli bilimsel temellere dayandırılmış olur.

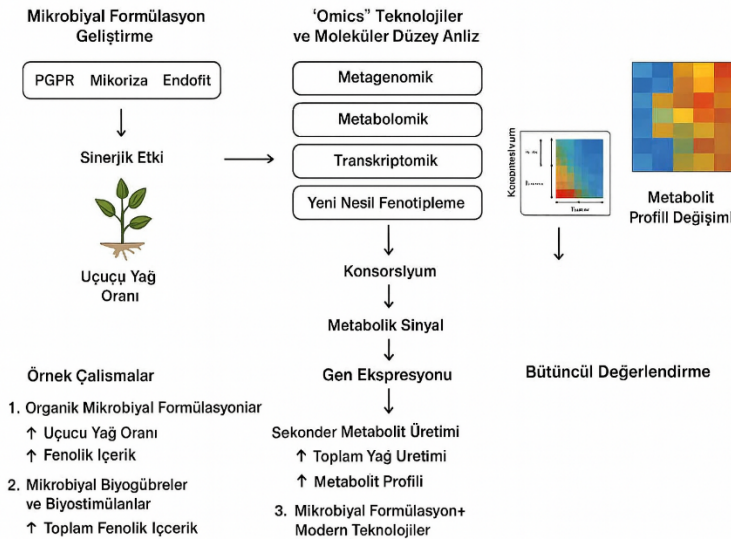
Mikrobiyal konsorsiyumların tıbbi aromatik bitkilerde sürdürülebilir tarım açısından rolü

Modern tarım uygulamaları, yüksek verim hedefiyle yoğun kimyasal gübre ve pestisit kullanımını artırmış, bu durum uzun vadede toprak sağlığı, ekolojik denge ve biyoçeşitlilik üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır (Tilman et al., 2002; Singh et al., 2019). Tıbbi aromatik bitkiler özelinde sürdürülebilir üretim, yalnızca çevresel koruma sağlamakla kalmayıp ürün kalitesi ve ekonomik değeri de doğrudan şekillendirmektedir (Tariyal, Ansari & Prasad, 2020). Bu bağlamda, mikrobiyal konsorsiyumlar, toprağın biyolojik bütünlüğünü koruyarak üretim süreçlerini optimize eden kritik bir biyolojik araç olarak öne çıkar.

Mikrobiyal konsorsiyumlar, bitkilerin besin alımını düzenleyerek kimyasal gübre ihtiyacını kayda değer ölçüde azaltabilmektedir (Dojima & Craker, 2018). Bu mekanizma, üretim maliyetlerinin düşürülmesini sağlarken toprağın mikrobiyal çeşitliliğini ve organik madde içeriğini destekler. PGPR, mikorizal mantarlar ve endofitik mikroorganizmaların oluşturduğu konsorsiyumlar, rizosferde besin mineralizasyonunu artırarak humus oluşumunu teşvik eder; böylece toprak yapısı ve su tutma kapasitesi iyileşir, bitki sağlığı ve verim artar (Golijan & Marković, 2019).

Kimyasal gübrelerin üretim ve lojistik süreçleri tarımsal karbon ayak izini önemli ölçüde artırmaktadır. Mikroorganizma içerikli biyolojik gübreler aracılığıyla yapılan uygulamalar, üretim ve lojistik kaynaklı karbon emisyonlarını azaltarak ekolojik sürdürülebilirliği güçlendirir (Badalingappanavar et al., 2018). Aynı zamanda, bu biyolojik çözümler, yenilenebilir ve doğadan türeyen mekanizmalarla tıbbi aromatik bitkilerde verim ve metabolik kapasiteyi artırırken çevresel riskleri minimize eder (Tariyal et al., 2020; Golijan & Marković, 2019).

Bu ekofizyolojik ve ekolojik etkiler, mikrobiyal konsorsiyumların yalnızca verim ve kaliteyi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda toprak sağlığı ve karbon ayak izinin iyileştirilmesine katkı sağlayan entegre bir biyolojik strateji sunduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, tıbbi aromatik bitki üretiminde sürdürülebilir tarım hedefleri açısından, bu mikroorganizma toplulukları üretimin hem ekolojik hem ekonomik açıdan verimliliğini belirleyen görünmez ama güçlü birer aktör olarak değerlendirilmektedir (şekil 5).



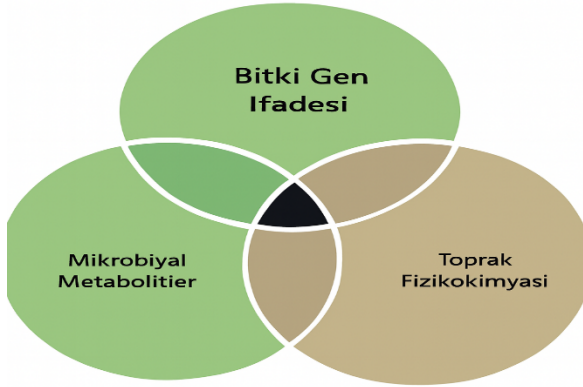
Şekil 5: Tıbbi aromatik bitkilerde Mikrobiyal konsorsiyumlar ve biyoteknolojik uygulamalar

Gelecek perspektifleri

Tıbbi bitkilerin üretiminde mikrobiyal konsorsiyumların kullanımına yönelik bilimsel ve teknolojik yaklaşım, son yıllarda dikkat çekici bir dönüşüm geçirmiştir. Mevcut bulgular, mikrobiyal etkileşimlerin yalnızca verimi ve kaliteyi artırmakla kalmayıp, ekosistem sürdürülebilirliğini yeniden tanımlayan bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Dojima & Craker, 2018; Wang et al., 2021). Gelecek perspektifleri değerlendirildiğinde, bu görünmez organizmaların biyoteknolojik olarak tasarlanması, izlenmesi ve optimize edilmesi üzerine kurulu yeni bir tarımsal paradigma doğmaktadır.

Mikrobiyal konsorsiyum tasarımı yapay zeka destekli modellemeler

Geleceğin mikrobiyal konsorsiyumları, yalnızca doğadan izole edilen mikroorganizmaların rastlantısal birleşimleri olmayacaktır. Makine öğrenimi, derin öğrenme ve büyük veri işleme yöntemleri, farklı PGPR türleri, mikorizalar ve endofitlerin birbirleriyle ve bitki metabolomuyla nasıl etkileştiğini modelleyebilir hâle gelmiştir. Bu yaklaşım, konsorsiyumların biyolojik ağ mimarisini çözerek, belirli aroma bileşenlerini maksimize eden özel formülasyonların tasarlanmasına imkân sağlayabilir (şekil 7). Bu tarz modeller özellikle lavanta, kekik, nane gibi uçucu yağ bileşenleri belirgin bitkilerde, arz–talep dengesini doğrudan etkileyebilecek stratejik bir üretim planlamasına kapı aralamaktadır.



Şekil.6: Bitki gen ekspresyonu, mikrobiyal metabolitler ve toprak fizikokimyası arasındaki üçlü etkileşim

Bitki–mikrop–toprak etkileşim ağlarının çözülmesi

Metagenomik, metatranskriptomik ve metabolomik teknolojiler sayesinde rizosfer artık bir bilinmez olmaktan çıkmaktadır. Köklere yakın mikrobiyal toplum yapısının, bitkinin stres fiziolojisi ve sekonder metabolit akışları üzerindeki etkileri artık çok katmanlı verilerle takip edilebilmektedir (Golijan & Marković, 2019).

Gelecek araştırmalar, özellikle şu hedeflere odaklanacaktır:

- Mikrobiyal fonksiyonel genlerin bitkide spesifik metabolit yollarını nasıl tetiklediği (örneğin menthol biyosentezini aktive eden mikrobiyal sinyal molekülleri).
- Rizosfer ağ yoğunluğu ve stabilitesinin aroma profili üzerindeki yansımaları

(örneğin kekikte timol/karvakrol oranını değiştiren mikrobiyal etkileşim modülleri).

- Toprak tipine göre optimize edilen konsorsiyum reçeteleri (kil, tınlı, kumlu topraklarda farklı mikrobiyal ağ davranışları).

Gen düzenleme teknolojileri ile geliştirilen mikroorganizmalar

CRISPR/Cas tabanlı sistemler (bir tür genom düzenleme tekniği) ile gelecekte daha dayanıklı, rizosfere daha iyi adapte olan ve bitkinin metabolik taleplerine daha hassas yanıt veren mikroorganizmaların geliştirilmesi mümkün olacaktır. Bu mikroorganizmalar:

- Stres toleransı yüksek gen kümelerine sahip olabilir,
- Tıbbi aromatik metabolit üretimini tetikleyen belirli sinyal yollarını güçlendirebilir,
- Toprak toksisitesini azaltan enzimler salgılayabilir.

Bu alan etik ve ekolojik çerçevede dikkatle ele alınması gereken sınırlamaya sahip olsa da kontrollü biyoteknolojik yaklaşımlar ile tıbbi ve aromatik bitkilerde kalite standardizasyonunun sağlanması açısından önemli avantajlar sunabilir.

Endüstriyel ölçekte uygulanabilirlik ve üretim ekonomisi

Mikrobiyal konsorsiyumların şu anda en büyük sınırlayıcı faktörü, üretimin tarla ölçeğine güvenli ve stabil bir şekilde taşınmasıdır. Bunun için gelecekte şu teknolojilerin öne çıkması beklenmektedir:

- Mikroenkapsülasyon teknolojileri:

Mikroorganizmaların sıcaklık, UV ışığı ve kuraklığa karşı stabilitesi artırılacak.

- Fermentasyon tabanlı kitlesel üretim sistemleri:

Endofit ve PGPR'ların yüksek yoğunluklu biyoreaktörlerde çoğaltılması.

➤ Rizosfer sensör teknolojileri:

Topraktaki mikrobiyal aktivitelerin gerçek zamanlı takibini sağlayan biyosensörler.

➤ Standartlaştırılmış konsorsiyum protokolleri:

Lavanta, kekik, adaçayı, nane gibi türler için spesifik mikrobiyal reçeteler.

Arabacı et al., (2021) özellikle nane üretiminde mikrobiyal gübre uygulamalarının uçucu yağ bileşenlerini ve verimi tarla seviyesinde anlamlı biçimde artırdığını göstermiş olup, endüstriyel uygulamaların fizibilitesine güçlü bir kanıt sunmaktadır.

Geleceği şekillendiren nihai anafikir ise şudur; gelecek, toprağın en büyük hazinesi olan bu mikroorganizmalar çok önemlidir. Mikrobiyal konsorsiyumlar artık yalnızca bir biyoteknoloji aracı değil; sürdürülebilir tarımın, ekolojik restorasyonun ve yüksek değerli tıbbi aromatik ürün üretiminin stratejik altyapısını oluşturan yeni nesil biyolojik mühendislik unsurlarıdır. Yapay zekâ tarafından modellenen, omik teknolojileriyle çözümlenen ve gen düzenleme yaklaşımlarıyla güçlendirilerek endüstriyel ölçekte uygulanabilir hâle gelen bu mikrobiyal formülasyonlar, bitkilerin kimyasal mimarisini, toprağın işleyiş ritmini ve tıbbi aromatik-tıbbi bitki sektörünün geleceğini yeniden tanımlayacak bir dönüşüm çağını işaret etmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tıbbi ve tıbbi aromatik bitkilerin üretimi, yüzyıllardır doğanın kimyasal çeşitliliği ile insanlığın farmasötik ve kültürel gereksinimleri arasında kurulmuş benzersiz bir dengeye dayanır. Modern tarımın kimyasal girdilere bağımlı yapısı ise bu dengeyi aşamalı olarak zayıflatmıştır. Bu noktada, rizosferde yaşayan mikrobiyal konsorsiyumlar, sürdürülebilir üretimin biyolojik temelini yeniden tanımlayan ileri bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada sunulan bulgular, mikrobiyal konsorsiyumların yalnızca verim artırıcı ajanlar olmadığını; bitki metabolizmasını yeniden yapılandırabilen, toprak fonksiyonlarını restore edebilen ve

uçucu yağ ile fitokimyasal profilleri belirgin biçimde iyileştirebilen entegre bir biyoteknolojik sistem niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır (Dojima & Craker, 2018; Wang et al., 2021). PGPR, mikoriza ve endofit etkileşimlerinin besin döngüsü, stres fizyolojisi ve sekonder metabolit akışı üzerindeki senkronize etkisi, tıbbi aromatik bitki üretiminde yeni bir fonksiyonel düzey tanımlamaktadır.

Uygulamalı çalışmalar, lavanta, kekik, adaçayı ve nane türlerinde mikrobiyal konsorsiyum uygulamalarının verim ve kaliteyi anlamlı ölçüde yükselttiğini; aynı zamanda kimyasal girdilere olan bağımlılığı azalttığını göstermektedir (Arabacı et al., 2021; Abd-Allah, 2020). Bu bulgular, organik üretimin ekonomik sürdürülebilirliğini artıran bilimsel bir çerçeve sunmaktadır (Tariyal et al., 2020). Geleceğe yönelik projeksiyonlar ise çok daha ileri bir dönüşüme işaret eder: mikrobiyal konsorsiyumların yapay zekâ ile modellenmesi, gen düzenleme teknikleri ile hassaslaştırılması ve endüstriyel ölçekte stabil formülasyonlara dönüştürülmesi, tıbbi aromatik bitkilerde üretim paradigmasını kökten değiştirecek kapasiteye sahiptir.

Artık mesele sadece bitki yetiştirmek değildir. Aslolan, rizosferin biyolojik mimarisini tasarlamak ve bitkinin kimyasal kaderini yönetmektir. Bu dönüşüm, tarımsal biyoteknolojiyi izleyen değil, yönlendiren bir bilim alanına dönüştürmektedir. Mikrobiyal konsorsiyumlar, toprağın derinliklerinde çalışan fakat etkisi üretim zincirinin tamamında hissedilen biyolojik mimarlardır. Toprağın işlevsel bütünlüğünü yeniden kurarak, bitki kimyasını rafine ederek ve üretim güvenilirliğini artırarak, tıbbi aromatik bitki tarımının gelecek vizyonunu oluşturmaktadırlar.

Bu çalışma;

1. Mikrobiyal konsorsiyumların, tıbbi aromatik bitkilerin biyolojik kapasitesini en üst düzeye çıkaran stratejik aktörler olduğunu,
2. Bu biyolojik ağların, sürdürülebilir tarım modellerinin yalnızca destekleyicisi değil, temel belirleyicisi olduğunu ve
3. Yapay zekâ ve gen düzenleme teknolojileri ile birleştğinde mikrobiyal konsorsiyumların, tamamen yönlendirilebilir ve

optimize edilebilir ileri biyoteknolojik araçlara dönüşebilme potansiyeli taşıdıklarını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla mikrobiyal konsorsiyumlar, tıbbi aromatik bitki üretiminde bir alternatif değil; yakın geleceğin zorunlu üretim mimarisidir. Bu yaklaşım ekosistem bütünlüğünü koruyan ve yüksek değerli fitokimyasal çıktılar sağlayan bilimsel temelli bir yol haritası sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abd-Allah, E. F. (2020). Influence of microbial consortia on essential oil content and antioxidant activity of aromatic plants. *Journal of Applied Microbiology*, 128(6), 1700–1715. <https://doi.org/10.1111/jam.14563>
- Abdel-Moneim, T. S., & Alariqi, M. (2025). Thymbra spicata extract and arbuscular mycorrhizae improve essential oil content and stress tolerance in Rosmarinus officinalis under salinity stress. *BMC Plant Biology*, 25, Article 220. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06221-6>
- Abou Jaoudé, R., Luziatelli, F., Ficca, A. G., & Ruzzi, M. (2025). Microbial consortia effects on growth and secondary metabolite production in aromatic plants. *Frontiers in Plant Science*, 16, 104587. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.104587>
- Ahmad, M., Khan, A. L., Al-Harrasi, A., & Hussain, J. (2022). Plant-microbe interactions and secondary metabolite production under stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 13, 870124. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.870124>
- Ali, S., Khan, S., Amjad, M., et al. (2024). Microbial inoculants enhance secondary metabolite accumulation in medicinal and aromatic plants. *Journal of Applied Microbiology*, 137(4), 1027–1041. <https://doi.org/10.1111/jam.16121>
- Ali, W., Khalid, M., & Ullah, H. (2023). Improvements in the biochemical responses and heavy metal phytoremediation of Lavandula angustifolia through Funneliformis mosseae inoculation. *BMC Plant Biology*, 23, Article 252. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04265-0>
- Arabacı, O., Yılmaz, E., & Kaya, M. (2021). Field-scale evaluation of microbial inoculants on essential oil yield and quality in Mentha piperita. *Industrial Crops and Products*, 164, 113397. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113397>
- Badalingappanavar, R., Hanumanthappa, M., Veeranna, H. K., Shashikala, K., & Khidirapure, G. (2018). Organic fertilizer management in cultivation of medicinal and aromatic crops: a review. *College of Horticulture, Mudigere Karnataka, National Conference Proceedings*.
- Bai, Y.-C., Chang, Y.-Y., Hussain, M., Lu, B., Zhang, J.-P., Song, X.-B., Lei, X.-S., & Pei, D. (2020). Soil chemical and microbiological properties are changed by long-term chemical fertilizers that limit ecosystem functioning. *Microorganisms*, 8(5), 694. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050694>
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Cavanagh, H. M. A., & Wilkinson, J. M. (2002). Biological activities of lavender essential oil. *Phytotherapy Research*, 16(4), 301–308. <https://doi.org/10.1002/ptr.1103>
- Chou, Y., Lee, K., & Hsieh, C. (2023). Microbial consortia and monoterpene accumulation in Lavandula spp. *Plant Biotechnology Journal*, 21(7), 1425–1438. <https://doi.org/10.1111/pbi.14001>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.005>
- Crusciol, C. A., Rodrigues, R. A. F., & Berbara, R. L. L. (2024). Rhizosphere microbial consortia and plant nutrient use efficiency. *Applied Soil Ecology*, 190, 104833. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.104833>

- Çelik, S. A., & Ayran, İ. (2020). Antioksidan kaynağı olarak bazı tıbbi ve tıbbi aromatik bitkiler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 13(2), 115–125.
- Çiçek, C. (2021). Türkiye’de ekonomik önemi bulunan tıbbi ve tıbbi aromatik bitkilerin sektör analizi (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dojima, T., & Craker, L. E. (2018). Biofertilization and plant growth promoting microorganisms in medicinal plant production. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 24(3), 251–267. <https://doi.org/10.1080/10496475.2018.1482971>
- Ertürk, Y., Çakmakçı, R., Ömür, D., Turan, M. (2011) "The effects of plant growth promotion rhizobacteria PGPR on vegetative growth and leaf nutrient contents of hazelnut seedlings Turkish hazelnut cv Tombul and Sivri", *International Journal of Soil Science*, 6 (3) pp. 188-198
- Ertürk, Y., Ercişli, S., Çakmakçı, R. (2012) "Yield and growth response of strawberry *FragariaX ananassa* Duch to plant growth promoting Rhizobacteria inoculation", *Journal of Plant Nutrition* (35:817-826)., 35 (6) pp. 817-826
- Ertürk, Y., Şirin, E., & Kazankaya, A. (2022). Effects of PGPR, AMF and Trichoderma applications on adaptation abilities to different biotic and abiotic conditions in medicinal and aromatic plants. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*, 10(2), 166–173. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i2.166-173.4615>
- Foster, R., Martin, M., & Brown, D. (2017). Multi-strain microbial inoculants: Synergistic effects on plant growth and health. *Agronomy*, 7(3), 45. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030045>
- Francioli, D., Kampouris, I., Kuhl-Nagel, A., et al. (2025). Microbial consortia-mediated enhancement of photosynthesis and metabolite production in aromatic plants. *Plant Science*, 331, 111533. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.111533>
- Ghelardini, C., Galeotti, N., Salvatore, G., & Mazzanti, G. (1999). Local anaesthetic activity of the essential oil of *Lavandula angustifolia*. *Planta Medica*, 65(8), 700–703. <https://doi.org/10.1055/s-1999-14045>
- Golijan, J., & Marković, T. (2019). Rhizosphere microbial networks and secondary metabolite production in aromatic plants. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01453>
- Ham, I., Lee, H., & Kim, S. (2022). Microbial modulation of phenolic biosynthesis in medicinal plants. *Journal of Plant Physiology*, 273, 153765. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153765>
- Hardoim, P. R., van Overbeek, L. S., Berg, G., et al. (2015). The hidden world within plants: Ecological and evolutionary considerations for endophytic bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 79(3), 293–320. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00050-14>
- Jakubowska, A., & Gośliński, M. (2025). Effects of microbial consortia on phenolic and flavonoid compounds in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 208, 109964. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.109964>
- Kapoor, R., Freitas, H., & Puri, G. (2002). Influence of arbuscular mycorrhizal symbiosis on essential oil yield and composition in *Coriandrum sativum*, *Cuminum cyminum*, and *Foeniculum vulgare*. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 345–354.
- Kıtır Şen, N, & Duran, A. (2021). A new approach on essential oil production of *Origanum onites* L.: Microbial fertilization and microwave extraction. *Industrial Crops and Products*, 165, 113444. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113444>
- Kutlu, M., Çakmakçı, R., Hosseinpour, S., & Karagöz, E. (2019). Effect of PGPR on growth, nutrient uptake and essential oil composition of *Origanum onites*. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 92, 123–132. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2019.092.018>

- Lin, X., Chen, J., & Li, W. (2022). Modulation of plant secondary metabolites by microbial consortia: Mechanisms and applications. *Frontiers in Microbiology*, 13, 845312. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845312>
- Lv, X., Wang, Y., & Zhang, L. (2024). Microbe-mediated regulation of terpenoid biosynthesis in aromatic plants. *Phytochemistry*, 208, 113157. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2023.113157>
- Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., et al. (2020). Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. *Land*, 9(2), Article 34.
- Muñoz Bautista, J. M., Sánchez Hernández, C., & Tercedor Sánchez, J. (2025). Environmental and health impacts of pesticides: A meta-analysis of soil fauna communities. *Agronomy*, 15(8), 1878. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081878> MDPI
- Ng, S., Tan, H., & Lim, Y. (2024). Alkaloid accumulation in plants influenced by rhizosphere microbial consortia. *Plant Biology*, 26(1), 110–123. <https://doi.org/10.1111/plb.13201>
- Ni, B., Wang, Y., Ma, Z., (2025). Increasing pesticide diversity impairs soil microbial functions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(36). <https://doi.org/10.1073/pnas.2419917122> PNAS
- Nitrogen Fertilization Shapes Soil Microbial Diversity and Ecosystem Multifunctionality by Modulating Soil Nutrients. (2025). *Microorganisms*.
- Ogbe, F., Gupta, S., & van Staden, J. (2023). Endophytic bacteria and phenolic metabolite modulation in aromatic species. *South African Journal of Botany*, 158, 510–521. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.03.010>
- Ortiz, M., & Albacete, A. (2006). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and polyphenol profile of *Ocimum basilicum* and other species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44(5–6), 287–295.
- Pakdemirli, B. (2020). Economic importance of medicinal and aromatic plants in Turkey: The examples of thyme and lavender. *Bahçe*, 49(1), 51–58. <https://doi.org/10.17660/bahce.2020.49.1.5>
- Pang, Z., & Chen, H. (2021). Cross-talk between plants and rhizosphere microbes via secondary metabolites. *Frontiers in Plant Science*, 12, 645515. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.645515>
- Poudel, R., Jumpponen, A., Schlatter, D., et al. (2021). Microbiome-mediated enhancement of plant health and metabolite accumulation. *Plant and Soil*, 460, 45–63. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04863-2>
- Rojas-Aréchiga, M., & de la Rosa, J. A. (2004). Arbuscular mycorrhiza differentially affects synthesis of essential oils in *Coriandrum sativum* and *Anethum graveolens*. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 150–157. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26070450/>
- Saleem, M., Arshad, M., Hussain, S., & Khalid, A. (2021). Microbial consortia for abiotic stress management in plants. *Applied Soil Ecology*, 161, 103845. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103845>
- Sánchez-Rangel, D., & Ruz-Campos, M. (2019). Yield, essential oil, and quality performance of *Artemisia dracunculus*, *Hyssopus officinalis*, and *Lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants*, 9(3), 375. <https://doi.org/10.3390/plants9030375>
- Schmidt, R., Ulanova, D., Wick, L., Bode, H., & Garbeva, P. (2014). Microbe-driven chemical ecology in the rhizosphere. *Journal of Chemical Ecology*, 40, 775–787. <https://doi.org/10.1007/s10886-014-0472-6>

- Sen, T., & Diğerleri. (2015). Medicinal plants, human health and biodiversity: a broad review. *Journal of Natural Medicines*,
- Singh, R., Pandey, V., & Singh, P. (2019). Chemical fertilizers and their impact on soil health and environment. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(4), 1125–1135. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.129>
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.). Academic Press.
- Suriani, M., Rasyid, A., & Handayani, T. (2025). Microbial consortia enhance bioactive compounds in aromatic and medicinal plants. *Journal of Plant Interactions*, 20(1), 101–115. <https://doi.org/10.1080/17429145.2025.1004217>
- Swaine, M., (2025). Impact of pesticides on soil health: identification of key soil microbial indicators. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(6).
- Tariyal, R., Ansari, M. W., & Prasad, M. (2020). Microbial inoculants for sustainable aromatic plant production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292, 106792. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106792>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671–677.
- Timofeeva, A., Ivanov, A., & Kiseleva, T. (2023). Omics-guided design of microbial consortia for sustainable agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1123456. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1123456>
- Tiring, G., Satar, S., & Özkaya, O. (2021). Sekonder metabolitler. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 35(1), 203–215.
- Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. R. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003>
- Wahab, A., Khan, A. L., & Lee, I. J. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth and productivity under abiotic stress. *Plants*, 12(17), 3102. <https://doi.org/10.3390/plants12173102>
- WHO. (2023). Traditional medicine strategy 2014–2023. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/>
- Wu, F., Wu, J., & Wang, H. (2023). Terpenoid biosynthesis in aromatic plants influenced by rhizosphere microbes. *Industrial Crops and Products*, 192, 116299. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116299>
- Zhang, S., (2024). Effects of light on secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 781236
- Zhang, Y., Shen, H., He, X., Thomas, B. W., Lupwayi, N. Z., Hao, X., Thomas, M. C., & Shi, X. (2017). Fertilization shapes bacterial community structure by alteration of soil pH. *Frontiers in Microbiology*, 8, Article 1325. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01325>

TÜRKİYE FLORASINDA DOĞAL YAYILIŞ GÖSTEREN BRASSICACEAE FAMILYASINA AİT *MATTHIOLA* *LONGIPETALA* (VENT.) DC. TÜRÜNÜN ANATOMİK ÖZELLİKLERİ

Sibel Ulcay *

GİRİŞ

Brassicaceae (Turpgiller) familyası, yaklaşık 3.700–4.000 tür ve 330–340 cins içeren, geniş ve evrimsel açıdan oldukça çeşitlilik gösteren bir otsu bitki grubudur (Hohmann vd., 2015; Al-Shehbaz, 2008). Familya üyeleri genellikle yıllık, iki yıllık veya çok yıllık otsu bitkiler olup, nadiren cüce çalı formunda türler de bulunur (Hohmann vd., 2015). Yapraklar stipulsüz, çiçekler dört taç yapraklıdır (bu nedenle familya tarihsel olarak Cruciferae adıyla da anılmıştır) ve genellikle altı stamenlidir (dört uzun, iki kısa). Çiçekler zygomorfik veya aktinomorfik simetri gösterebilir. Meyveler, iki kapaklı kapsül formunda olup siliku veya silikula olarak adlandırılır (Beilstein vd., 2006).

Brassicaceae, lahanası, brokoli, karnabahar, turp, hardal ve wasabi gibi tarımsal öneme sahip pek çok ekonomik bitkiyi kapsar (Plaza vd., 2024). Ayrıca, küçük genomu sayesinde ilk tam dizilenmiş bitki genomuna sahip olan *Arabidopsis thaliana*, moleküler biyoloji, genetik ve evrimsel biyoloji araştırmalarında model organizma olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Mitchell-Olds vd., 2001; Al-Shehbaz vd., 2025).

Çeşitli araştırmalar, Brassicaceae familyasında çiçek morfolojisi (örneğin trikoma tipleri ve zygomorfizm), yaprak anatomisi ve polen morfolojisinde tekrarlayan evrimsel örüntüler bulunduğunu ortaya koymuştur (Beilstein vd., 2006; Hohmann vd., 2015). Bu durum,

* Doç. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Kırşehir
sibel.ulcay@ahievran.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2878-1721

familya genelinde paralel (konvergent) evrimin sıkça gerçekleştiğini göstermektedir (Huang vd., 2016).

Brassicaceae üyeleri yalnızca ekolojik ve evrimsel açıdan değil, aynı zamanda tıbbi ve aromatik özellikleri bakımından da önemli bir yere sahiptir. Günümüzde bu familyaya ait türler; halk hekimliğinde, kozmetik ürünlerde ve farmasötik uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Özdemir, 2025a; Özdemir, 2025b). Bu bağlamda, bitki türlerinin yetiştirme koşullarının, çevresel faktörlere olan yanıtlarının ve tarımsal uygulamaların (örneğin vermikompost uygulamaları) bitkilerin kimyasal içeriği ve fenolojik özellikleri üzerindeki etkileri önemli araştırma konularıdır (Hepşen-Türkay, 2024). Çevre koşullarındaki değişimin, toprak biyolojik göstergeleri üzerindeki etkileri de (örneğin katalaz aktivitesi gibi biyolojik indikatörler) degrade olmuş toprakların incelenmesinde kritik bir role sahiptir (Hepşen-Türkay vd., 2024). Ayrıca, vermikompostlama süreçlerinin verimliliğini artırmaya yönelik araştırmalar (örneğin ısı ön işleminin solucan popülasyonu ve kokon üretimine etkisi) de toprağın iyileştirilmesi ve sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önem arz etmektedir (Hepşen-Türkay, 2023).

Bu familyanın önemli cinslerinden biri olan *Matthiola*, süs değeri yüksek, aromatik bileşikler bakımından zengin türleriyle dikkat çeker. *Matthiola longipetala* (Vent.) DC., yıllık veya çok yıllık gelişim gösteren, özellikle akşam saatlerinde yaydığı hoş kokusuyla tanınan bir türdür. Bu nedenle literatürde “night-scented stock” (gece kokulu şebboy) olarak anılmaktadır (Şahin, 2023; Karaca, 2023). Bitki genellikle 45 cm’yi aşmayan boyda olup, 15–27 mm uzunluğunda mor, pembe ya da nadiren beyaz renkte taç yapraklara sahiptir (Karaca, 2023). Akşam saatlerinde yayılan kokunun, gece aktif tozlayıcı böcekleri çekmek üzere gelişmiş bir adaptasyon olduğu düşünülmektedir. Bu özellik, *Matthiola* cinsini yalnızca ekolojik açıdan değil, süs bitkisi ticareti açısından da önemli kılmaktadır (Şahin, 2023).

Matthiola türleri; glukozinolatlar, flavonoidler ve uçucu yağlar gibi çeşitli ikincil metabolitler bakımından zengindir. Ancak *M. longipetala*’nın kimyasal profili ve biyolojik aktiviteleri, aynı cinsin diğer türlerine kıyasla daha az incelenmiştir (El-Amier vd., 2023). Son

yıllarda Kuzey Afrika ve Doğu Akdeniz bölgelerinden toplanan örnekler üzerinde yapılan çalışmalar, bu türün esansiyel yağ bileşiminde fenolik glikozitler, steroller ve yağ asitlerinin bulunduğunu göstermiştir (Rahmani vd., 2023). Ayrıca, metanol ekstraktlarının antioksidan, antimikrobiyal ve sitotoksik etkiler sergilediği bildirilmiştir (El-Amier vd., 2023; Rahmani vd., 2023).

Bu çalışma, Kırşehir ve çevresinde yayılış gösteren *Matthiola longipetala* taksonunun anatomik özelliklerini belirleyerek, tür üzerine ileride yürütülecek morfolojik, kimyasal ve ekolojik araştırmalara bilimsel katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Materyal ve metot

M. longipetala taksonu çiçeklenme döneminde Kırşehir Kervansaray Dağından toplanmış ve %70 alkolde tespit edilmiştir. Örneklerin teşhisleri yapılmış ve herbaryum örneği haline getirilmiştir (Davis 1965). Bitkinin kök, gövde ve yaprakları anatomik analiz için enine kesitler halinde hazırlanmıştır. Yaprakların hem enine kesitleri hem de yüzey kesitleri elle hazırlanmıştır. Bu kesitler daha sonra yarı kalıcı preparatlar hâline getirilmiş ve gliserin-jelatin tekniği ile sabitlenmiştir (Vardar, 1987). Preparatlar SOIF BK500-L mikroskobu ve AmScope FMA050 kamera sistemi kullanılarak incelenmiştir. Hazırlanan preparatların fotoğrafları çekilmiştir.

Bulgular

Kök

Kök enine kestine göre kök sekonder büyüme göstermektedir. En dış kısımda peridermis mevcuttur. Peridermiste 5-6 hücre sırasından oluşan fellem ayırt edilmektedir. Korteks daralmış olup dairesel şekilli parankima hücrelerinden meydana gelmektedir. Kambiyum ayırt edilemez durumdadır. Floem 9-10 sıralıdır. Öz bölgesi ksilem elemanları ile kaplıdır (Şekil 1 A, B).

Gövde

Primer yapıya sahip gövde enine kesiti dairesel şekillidir. En dışındaki epidermis hücreleri dairesel ve kare şeklindedir. Epidermis üzerinde ince bir kutikula tabakası gözlenmektedir. Yine bitkinin

epidermisinde eglandular tek hücreli dallanmış örtü tüyleri oluşmuştur. Korteks tabakasında parankima hücreleri 7-8 sıralıdır. İletim demetleri 10-13 adettir. İletim demetlerinin üzerinde ve intervasküler alanlarda sklerenkima hücreleri kümelenmiştir. Bitkinin öz bölgesi oldukça genişlemiş olup dairesel ve çokgen şekilli parankimatik hücrelerden oluşmaktadır. Parankima hücrelerinin arasında hücre arası boşluklar bulunmaktadır (Şekil 1 C, D, E).

Yaprak

Yaprak enine kesitine göre en dışta dairesel epidermis hücreleri bulunmaktadır. Epidermis üzeri çok sayıda 5-7 dallı eglandular, tek hücreli örtü türleri ile kaplıdır. Orta damar bölgesi belirgindir ve bir adet iletim demeti yer almaktadır. Mezofil farklılaşmış olup ve ekvifasiyaldir. Alt ve üst yüzeye doğru ikişer sıra halinde palizat parankima tabakası ve 3-4 sıralı sünger parankima tabakası bulunmaktadır. Yaprığın her iki yüzeyinde de stoma bulunmaktadır. Hem alt hem de üst yüzeyde stomalara rastlanmış olup yaprak amfistomatiktir. Üst yüzey stoma komşu hücreleri daha köşeli küçüktür. Yaprakta hem alt hem de üst yüzeyde stomaların koşu hücreleri 3- 5 adettir. Hem anomositik hem de anizositik stomalar yaprak alt yüzeyinde belirlenmiştir (Şekil 1 F, G, H, I, J).

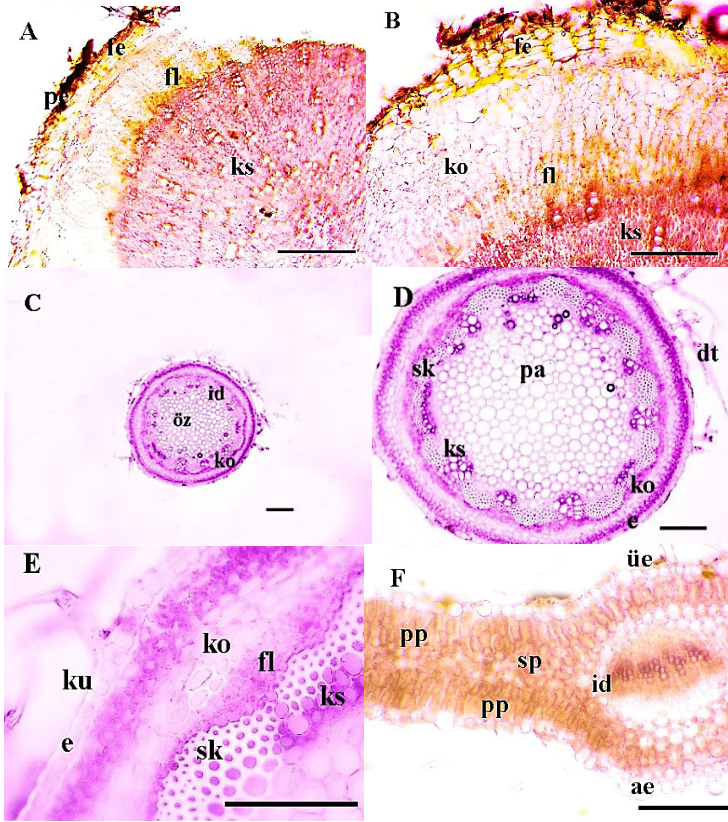
SONUÇ VE ÖNERİLER

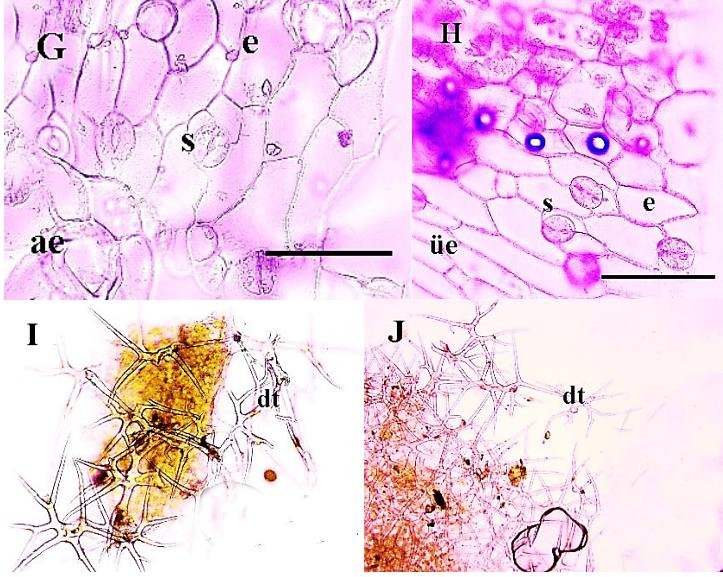
Bu çalışmada incelenen taksonun yaprak, kök ve gövde anatomisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve türün ayırt edici mikromorfolojik karakterleri ortaya konmuştur. Yaprak enine kesitinde belirlenen dairesel epidermis hücreleri, yoğun eglandular dallı tüy örtüsü, ekvifasiyal mezofil yapısı ve her iki yüzeyde stoma bulunması taksonun anatomik olarak amfistomatik karakterde olduğunu göstermektedir. Üst yüzeydeki stoma komşu hücrelerinin daha köşeli ve küçük olması ile alt yüzeyde hem anomositik hem anizositik stomaların bir arada bulunması, türün tanısal değer taşıyan özgün epidermal özelliklerindendir. Yaprakta iki sıralı palizat ve 3-4 sıralı sünger parankiması bulunması, fotosentetik kapasite ve gaz değişim süreçlerinin yapısal temellerini ortaya koymaktadır.

Kök enine kesitinde gözlenen sekonder büyüme, belirgin peridermis tabakası ve çok sıralı fellem dokusu, türün yaşlanmaya bağlı koruyucu

doku gelişimini güçlü şekilde sürdürdüğünü göstermektedir. Kambiyumun belirgin olmaması ve öz bölgesinin ksilem elemanları ile doldurulmuş olması, iletim sisteminin ileri gelişim sürecini destekleyen yapılardır. Floemin 9–10 sıralı olması, türün fizyolojik iletim kapasitesine ilişkin önemli bir anatomik göstergedir.

Gövde enine kesitinde primer yapı korunmuş olmakla birlikte, intervasküler alanlarda ve iletim demetlerinin üzerinde yoğun sklerenkima birikimi, bitkinin mekanik destek gereksinimine uyumlu bir anatomik düzenleme sunmaktadır. Geniş öz bölgesi, çokgen ve dairesel parankimatik hücrelerden oluşması ve hücre arası boşlukların belirginliği, gövdenin metabolik madde depolama ve gaz değişimi açısından fonksiyonel bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.





Şekil 1. A, B kök enine kesiti, C, D, E gövde enine kesiti, F yaprak enine kesiti, G, H, I, J yaprak yüzeysel kesitleri. ae alt epidermis, dt dallanmış örtü tüyü, e epidermis, fe felleme, fl floem, id iletim demeti, ka kambiyum, ko korteks, ks ksilem, ku kutikula, ö öz, pe peridermis, pp palizat parankiması, sp sünger parankiması, sk sklerenkima, s stoma, üe üst epidermis

Bu çalışmanın bulguları, türün yakın akraba taksonlarla karşılaştırmalı anatomik olarak yeniden değerlendirilmesinin yararlı olacağını göstermektedir. Ayrıca amfistomatik yaprak yapısı, tüy yoğunluğu ve mezofil farklılaşması gibi özelliklerin türün habitat koşullarıyla ilişkisinin araştırılması, ekolojik uyum mekanizmalarının anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Epidermal yapıların, stoma tiplerinin ve tüy morfolojisinin SEM analizleriyle desteklenmesi ise tanısal karakterlerin daha kesin ve güvenilir biçimde ortaya konmasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Açar, M. İ., Satıl, F. ve Dirmenci, T. (2012). *Kazdağlarından dünya için yeni bir tür: Matthiola trojana üzerinde anatomik çalışmalar. Kazdağları III. Ulusal Sempozyumu.*
- Al-Shehbaz, I. A. (2025). The Brassicaceae then and now: Advancements in the past three decades, a review. *Annals of Botany*, mcaf055.
- Al-Shehbaz, I. A. O’Kane, S. L. Jr. ve Koch, M. A. (2008). Brassicaceae phylogeny inferred from phytochrome A and ndhF sequence data: Tribes and trichomes revisited. *American Journal of Botany*, 95(10), 1307–1327. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800065>
- Beilstein, M. A. Al-Shehbaz, I. A. ve Kellogg, E. A. (2006). Brassicaceae phylogeny and trichome evolution. *American Journal of Botany*, 93(4), 607–619. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.4.607>
- Davis, P. H. (Ed.). (1965). *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*. Edinburgh University Press. Vol. 1, 447–450.
- Hepşen-Türkay, F.Ş. (2024). Vermicompost effects on soil chemistry and biology: correlations with basil (Ocimum basilicum L.) total phenolic content and phenological traits. *Black Sea Journal of Agriculture*, 7(5) pp. 437–450 <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1489757>
- Hepşen-Türkay, F.Ş. (2023). Heat pre-treatment as an initial step in vermicomposting significantly influences worm population and cocoon production. *Soil Studies*, 12(2), 102–110 <https://doi.org/10.21657/soilst.1408077>
- Hepşen-Türkay, F.Ş. Durmuş, M. ve Yakupoğlu, T. (2024). Exploring catalase activity as a biological indicator in degraded soils. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, 39 (2), 401–417 <https://doi.org/10.7161/omuanajas.1426932>
- Hohmann, N. Wolf, E. M. Lysak, M. A. ve Koch, M. A. (2015). A time calibrated road map of Brassicaceae species radiation and evolutionary history. *The Plant Cell*, 27(10), 2770–2784. <https://doi.org/10.1105/tpc.15.00482>
- El-Amier, Y. A. Zaghoul, N. S. ve Abd-ElGawad, A. M. (2023). Bioactive chemical constituents of *Matthiola longipetala* extract showed antioxidant, antibacterial, and cytotoxic potency. *Separations*, 10(1), 53. <https://doi.org/10.3390/separations10010053>
- Karaca, M. (2023). *Kocaeli bitkileri veritabanı: Matthiola longipetala tür özellikleri*. Kocaeli Bitkileri. <https://kocaelibitkileri.com>
- Mandáková, T. Novikova, P. Y. Lysak, M. A. ve Koch, M. A. (2017). Plastome phylogeny and early diversification of Brassicaceae. *BMC Genomics*, 18, 116. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3555-3>
- Mitchell-Olds, T. (2001). *Arabidopsis thaliana* and its wild relatives: A model system for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(12), 693–700. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(01\)02236-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02236-6)
- Noori, M., ve Nezamabadi, A. R. (2023). Comparative epidermal leaf anatomy of some Brassicaceae with emphasis on its systematic implication. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 7(2), 45–57.
- Özdemir, N. (2025a). Menstrual sağlıkta kullanılan tıbbi bitkiler. G. Öztürk ve M. Erdoğan (Eds.), *Ebelik alanında uluslararası araştırmalar içinde* (ss. 23–38). Eğitim Yayınevi.
- Özdemir, N. (2025b). Aile planlaması sürecinde kullanılan tıbbi ve aromatik bitkiler. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 13(1), 221–228. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i1.221-228.6256>
- Rahmani, R. Bouajila, J. Jouaidi, M. ve Debouba, M. (2023). Discriminative metabolomics analysis and cytotoxic evaluation of flowers, leaves, and roots extracts of *Matthiola longipetala* subsp. *livida*. *Metabolites*, 13(8), 909. <https://doi.org/10.3390/metabo13080909>
- Şahin, H. (2023). *Matthiola longipetala* türünün morfolojik ve fitokimyasal özellikleri üzerine bir inceleme (Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi). *Anadolu Üniversitesi Açık Arşiv*. <https://earsiv.anadolu.edu.tr>
- Tekin, M. Yılmaz, G. ve Martin, E. (2013). Morphological, anatomical and palynological studies on endemic *Matthiola anchoniifolia* Hub.-Mor. (Brassicaceae). *Notulae Scientia Biologicae*, 5(2), 163–168.
- Vardar, Y. (1987). *Botanikte preparasyon tekniği*. Ege Üniversitesi Yayınları.